

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-13-135683-09371A

12/11/2013

**Impacts du changement climatique sur la
stabilité des versants**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Impacts du changement climatique sur la stabilité des versants

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédigé par	Vérifié par	Approuvé par
NOM	Auxane CHERKAOU	Marwan AL HEIB	Mehdi GHOREYCHI
Fonction	Ingénieur de l'unité «Risques Naturels, Ouvrages et Stockages» de la Direction des Risques du sol et du sous-sol	Ingénieur de l'unité «Risques Naturels, Ouvrages et Stockages» de la Direction des Risques du sol et du sous-sol	Directeur des Risques du sol et du sous-sol
Signature		P.O. JKa 	

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	7
2. CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	9
2.1 EVOLUTION PREVISIBLE DU CLIMAT	9
2.2 APPLICATION AU CONTEXTE FRANÇAIS	10
2.2.1 <i>Impact sur les températures</i>	10
2.2.2 <i>Impact sur les précipitations</i>	11
3. STABILITE DES VERSANTS NATURELS	13
3.1 MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES AUX VERSANTS NATURELS.....	13
3.1.1 <i>Aléa glissements de terrain superficiels</i>	13
3.1.2 <i>Aléa glissements de terrain profonds</i>	14
3.1.3 <i>Aléa chutes de blocs ou éboulements rocheux</i>	14
3.1.4 <i>Aléa laves torrentielles</i>	15
3.2 CRITERES DE STABILITE	16
3.2.1 <i>Paramètres influençant l'aléa</i>	16
3.2.2 <i>Coefficient de sécurité</i>	17
3.3 PHENOMENE D'ALTERATION : CAS PARTICULIER D'UNE ROCHE CALCAIRE.....	18
3.3.1 <i>Processus d'altération</i>	19
3.3.2 <i>Facteurs d'altération</i>	19
3.4 CONCLUSION	20
4. IMPACTS DES PARAMETRES CLIMATIQUES SUR LA STABILITE DES VERSANTS ET DES FALAISES NATURELS.....	21
4.1 IMPACT DES PRECIPITATIONS	21
4.1.1 <i>Versant naturel</i>	21
4.1.2 <i>Falaise rocheuse calcaire</i>	22
4.2 IMPACT DES TEMPERATURES.....	23
4.2.1 <i>Versant naturel</i>	23
4.2.2 <i>Falaise rocheuse calcaire</i>	23
4.3 IMPACT DE LA VEGETATION	24
4.4 IMPACT DU VENT.....	25
4.5 AUTRES PARAMETRES : FACTEURS PROPRES AU SITE	25
4.5.1 <i>L'altitude</i>	25
4.5.2 <i>L'orientation</i>	25
4.5.3 <i>Les caractéristiques de la roche</i>	25
4.5.4 <i>Les caractéristiques des fractures</i>	26
4.5.5 <i>Le facteur humain</i>	26
4.6 SENSIBILITES DES DIFFERENTS ALEAS AUX PARAMETRES CLIMATIQUES.....	26
4.6.1 <i>Sensibilité de l'aléa glissement superficiel</i>	26
4.6.2 <i>Sensibilité de l'aléa glissement profond</i>	27
4.6.3 <i>Sensibilité de l'aléa éboulement et chute de blocs</i>	27
4.6.4 <i>Sensibilité de l'aléa laves torrentielles</i>	27
5. PARTICULARITES LIEES AUX MILIEUX SENSIBLES	29
5.1 MILIEU MONTAGNARD	29
5.1.1 <i>Aléas glaciaires</i>	29
5.1.1.1 <i>Vidange de lac glaciaire</i>	29
5.1.1.2 <i>Poches d'eau glaciaire</i>	29
5.1.1.3 <i>Chute de séracs</i>	30
5.1.1.4 <i>Dégradation du pergélisol</i>	30

5.1.2	<i>Principal paramètre climatique influençant l'aléa : la température</i>	31
5.2	MILIEU COTIER	31
5.2.1	<i>Aléas côtiers</i>	31
5.2.1.1	Erosion côtière	31
5.2.1.2	Submersion marine	32
5.2.2	<i>Paramètres climatiques influençant les aléas</i>	33
5.2.2.1	Le vent	33
5.2.2.2	L'hydrodynamique marine	33
5.2.2.3	L'hydrologie « continentale »	34
5.2.2.4	Les événements extrêmes	34
6.	QUANTIFICATION DES IMPACTS	35
6.1	GLISSEMENTS DE TERRAIN SUPERFICIELS	35
6.1.1	<i>Evolution de l'intensité face au changement climatique</i>	35
6.1.2	<i>Evolution de la fréquence face au changement climatique</i>	35
6.2	GLISSEMENTS DE TERRAIN PROFONDS	35
6.2.1	<i>Evolution de l'intensité face au changement climatique</i>	35
6.2.2	<i>Evolution de la fréquence face au changement climatique</i>	36
6.3	EBOULEMENTS ET CHUTES DE BLOCS	36
6.3.1	<i>Evolution de l'intensité face au changement climatique</i>	36
6.3.2	<i>Evolution de la fréquence face au changement climatique</i>	37
6.4	LAVES TORRENTIELLES	37
6.4.1	<i>Evolution de l'intensité face aux paramètres climatiques</i>	37
6.4.2	<i>Evolution de la fréquence face aux paramètres climatiques</i>	37
6.5	MILIEUX SPECIFIQUES	37
6.5.1	<i>Impact du changement climatique sur les aléas montagnards</i>	37
6.5.2	<i>Impact du changement climatique sur les aléas côtiers</i>	38
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	39
8.	BIBLIOGRAPHIE	41

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Prévision des températures moyenne en France selon différents scénarios et périodes	11
Figure 2 : Evolution des précipitations moyennes (mm/jour) en France selon différents scénarios et périodes.....	12
Figure 3 : Glissement plan sur la RD 28 en 2002 à Merlas (Isère, 38).....	13
Figure 4 : Glissement de Séchilienne, (Isère, 38).....	14
Figure 5 : Versant rocheux fracturé � Conflans-Sainte-Honorine (78).....	15
Figure 6 : Laves torrentielles puissantes � Pinsot en 2008 (Isère, 38)	16
Figure 7 : Répartition de l'eau de surface et l'eau souterraine en fonction de la perméabilité du massif	21
Figure 8 : Influence de la température sur les cycles de gel-dégel.....	24
Figure 9 : Formation et rupture d'une poche d'eau.....	29
Figure 10 : Zone de pergélisol.....	30
Figure 11 : Falaises � proximité d'Étretat en Seine Maritime (76).....	32
Figure 12 : Plage à galets à proximité d'Étretat en Seine Maritime (76).....	32
Figure 13 : Les différentes modes de submersion marine.....	33

1. INTRODUCTION

Les versants naturels font partie intégrante du paysage français. Des cours d'eau ont creusé de larges vallées laissant apparaître des coteaux caractérisés par des fronts de falaise plus ou moins hauts. Les berges du milieu côtier où les falaises en milieu montagnard présentent, eux aussi, une morphologie de type versant. Malgré les différences de 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 et sont 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. De nombreuses hypothèses sont prises, notamment en ce qui concerne l'évolution de l'émission des gaz à effet de serre dans les décennies à venir. Les processus complexes qui en découlent permettent de prévoir avec un certain degré d'incertitude les températures et les précipitations attendues. En partant de cette base, l'objectif de ce rapport est de caractériser l'impact attendu du changement climatique sur la stabilité des versants naturels.

Pour ce faire, ce rapport rappelle d'abord les prévisions du GIEC concernant l'évolution des températures et des précipitations. Il décrit ensuite comment les paramètres climatiques influent sur les critères de stabilité des versants naturels. Enfin, l'évolution de l'intensité et de la fréquence de chaque aléa lié au versant naturel est déterminée en fonction du changement climatique.

Ce rapport se place dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics EAT-DRS02 « Analyse, prévention et maîtrise des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables » sous le thème « la prévention et l'adaptation au changement climatique ».

2. CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le réchauffement du système climatique global est aujourd'hui largement admis par la communauté scientifique. Les hausses des températures moyennes de l'air et des océans, mesurées à l'échelle du Globe, ainsi que l'observation de la fonte des calottes glaciaires et de la montée du niveau moyen de la mer constituent des indicateurs forts (Didier et al., 2010).

Le GIEC a établi dans son rapport de 2007 que ce changement climatique est très probablement d'origine humaine (GIEC, 2007). Le phénomène est majoritairement attribué à l'accumulation, dans l'atmosphère, des gaz à effet de serre produits par le développement des activités humaines, notamment liées à l'industrie et au transport.

2.1 EVOLUTION PREVISIBLE DU CLIMAT

Le taux d'augmentation des gaz à effet de serre (le principal mesuré étant le gaz carbonique) est d'ores et déjà important et, malgré les mesures prises par certains gouvernements, il se poursuit. Les différents scénarios d'augmentation des teneurs en CO₂ ont permis aux experts de bâtir différentes simulations sur l'évolution des principaux paramètres du système climatique.

Les principaux éléments impactés par le changement climatique concernent :

- 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) (Didier et al., 2010) soit des froids extrême l'hiver et un réchauffement de 5 à 8°C l'été (Barring 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 qu'humides. Concernant les vagues de chaleur, des études récentes ont montré que dans le futur, les vagues de chaleur seront plus intenses, longues et fréquentes (Bastone et De la Torre, 2011). Les périodes de retour des températures extrêmes seront moitié moins longues en 2050 qu'aujourd'hui. Les températures minimales journalières devraient augmenter plus vite que les températures maximales quotidiennes, ce qui conduira à une diminution de la fourchette de températures diurnes (Huggel et al., 2012).
- 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 (Didier et al., 2010). 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. Cette hausse sera très variable d'une région à l'autre (Bastone et De la Torre, 2011) ;

- 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 ; Bastone et De la Torre, 2011). Les périodes de retour des précipitations extrêmes seront moitié moins longues en 2050 qu'aujourd'hui (Huggel et al., 2012). Pour ce qui concerne l'Europe, les experts évoquent l'augmentation des risques de crue éclair dans l'intérieur des terres ainsi que l'augmentation des inondations côtières mais aussi, dans les régions les plus méridionales, une réduction de la disponibilité en eau (Didier et al., 2010).

2.2 APPLICATION AU CONTEXTE FRANÇAIS

2.2.1 IMPACT SUR LES TEMPERATURES

Le réchauffement climatique en France est en moyenne plus important que celui observé à l'échelle du globe. Au cours du siècle dernier, la température moyenne mesurée a ainsi augmenté de +0,95°C sur le territoire français (comparé à +0,74°C au niveau mondial). L'analyse des chroniques de données sur la période 1951-2000 montre d'une part que les températures diurnes et les températures de fin de nuit sont plus élevées et d'autre part que le nombre de jours de gel diminue globalement. En termes prévisionnels, le modèle proposé par Météo France, dans l'hypothèse d'un doublement progressif du taux de gaz carbonique, prévoit un réchauffement modéré (1 à 2°C) en hiver sur la France mais plus élevé au Sud-Est du fait de la proximité de la mer Méditerranée. Au printemps, des anomalies thermiques supérieures à 2°C se rencontrent sur la moitié Sud. En été, et plus encore en automne, la zone affectée par une élévation de la température moyenne supérieure à 2°C recouvre la plupart du territoire métropolitain (Figure 1). Les augmentations sont plus faibles dans le nord, et plus élevées dans les régions du sud (UK office, 2010).

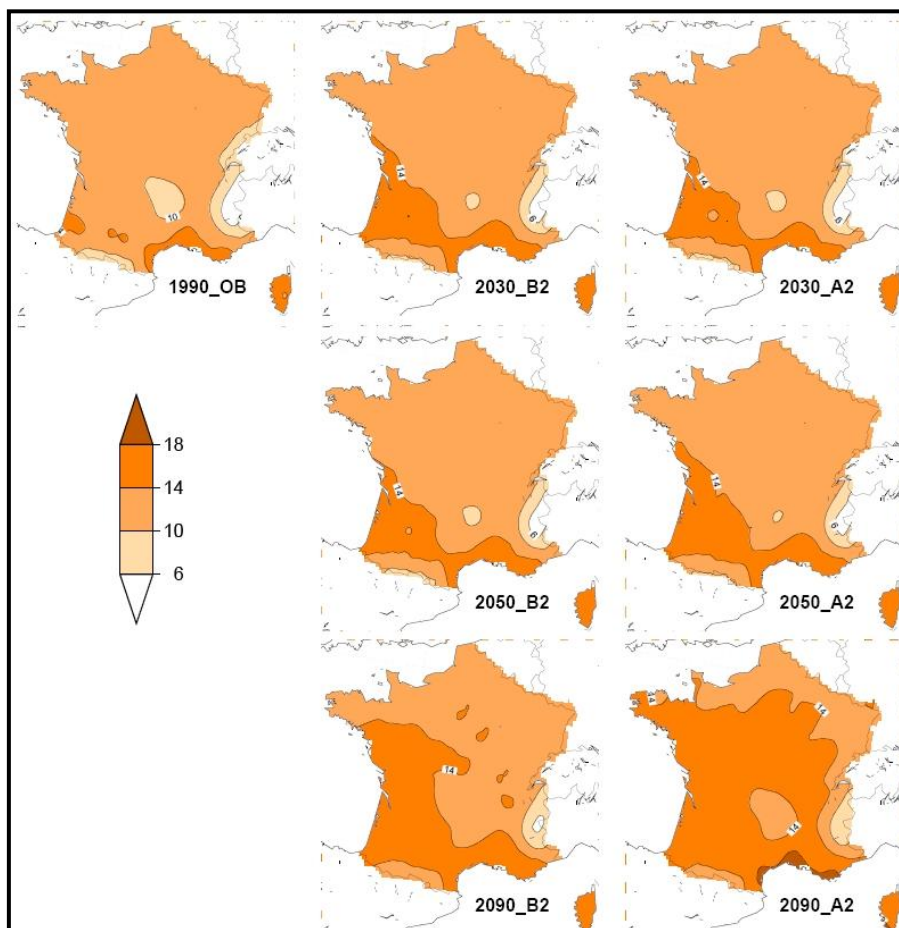


Figure 1 : Prévision des températures moyenne en France selon différents scénarios et périodes

(Source : MIES, 2000)

2.2.2 IMPACT SUR LES PRECIPITATIONS

En ce qui concerne les précipitations, il a été mis en évidence une augmentation de 7% du volume des précipitations sur la seconde moitié du vingtième siècle, tout comme une augmentation des contrastes saisonniers et une plus grande diversité régionale (Didier et al., 2012). Ainsi, dans le nord du territoire français, les précipitations ont tendance à augmenter en hiver (de 20% à 50% suivant les modèles) et à diminuer en été. Dans le Sud, c'est principalement une baisse durant la période estivale qui est décrite (Figure 2). La tendance qui se dégage aussi est celle d'une augmentation de la probabilité de survenue d'événements pluvieux exceptionnels sur l'ensemble du territoire métropolitain français.

Les projections à long terme indiquent aussi que les grands épisodes de sécheresse pourraient devenir beaucoup plus fréquents avec le changement climatique, et que le stress hydrique (manque d'eau pour les populations) pourrait augmenter de 12% à l'horizon 2100. De même, la sécheresse agricole pourrait augmenter en durée et en intensité (UK office, 2010).

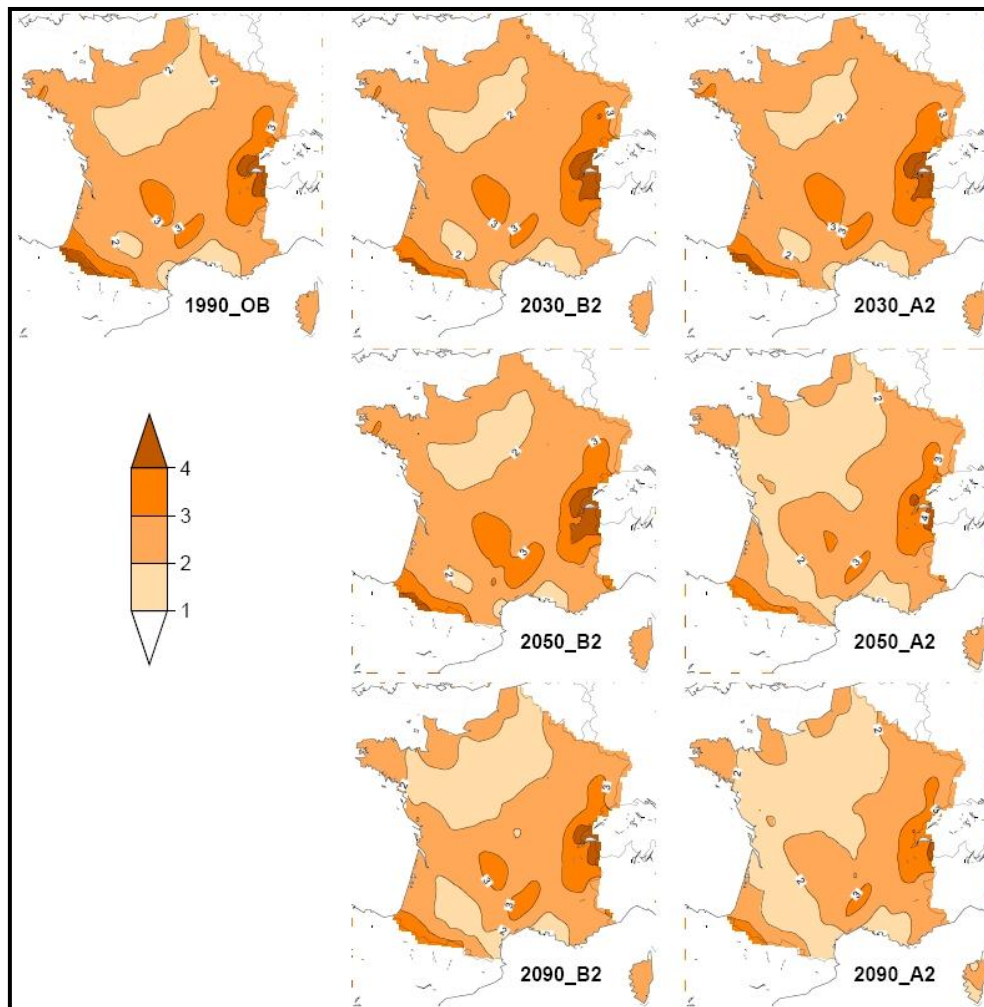


Figure 2 : Evolution des précipitations moyennes (mm/jour) en France selon différents scénarios et périodes
(Source : MIES, 2000)

3. STABILITE DES VERSANTS NATURELS

L'instabilité des versants naturels se manifestent par différents types de mouvements de terrain selon le site et les conditions extérieures. Il est donc important de déterminer les critères de stabilité des versants et des falaises pour savoir de quelle manière les conditions liées au changement climatique les impactent.

3.1 MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES AUX VERSANTS NATURELS

3.1.1 ALEA GLISSEMENTS DE TERRAIN SUPERFICIELS

Les glissements superficiels sont des mouvements de terrain lents (de quelques mm/an à quelques m/an) qui surviennent sur une pente plus ou moins instable. Ils sont caractérisés par une discontinuité de surface facilement identifiable (plane ou circulaire), séparant la partie stable de la partie en mouvement. Les glissements superficiels sont généralement profonds de quelques mètres (Figure 3).



Figure 3 : Glissement plan sur la RD 28 en 2002 à Merlas (Isère, 38)

(Source : Institut des Risques Majeurs, 2005)

3.1.2 ALEA GLISSEMENTS DE TERRAIN PROFONDS

Les glissements profonds se rapportent à des phénomènes d'instabilité de plus grande ampleur (mouvements de masse), qui peuvent affecter l'ensemble d'un versant (Figure 4). Ils sont généralement profonds de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres et mettent en jeu des mécanismes souvent complexes.



Figure 4 : Glissement de Séchilienne, (Isère, 38)

(Source : Photothèque INERIS)

3.1.3 ALEA CHUTES DE BLOCS OU EBOULEMENTS ROCHEUX

Les chutes de blocs sont des phénomènes d'instabilité qui impliquent le détachement de rochers ou de blocs d'une paroi rocheuse ou d'une pente instable (Figure 5) et les mouvements qui s'ensuivent (chute libre, rebond, roulement, glissement) le long de la pente jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Les chutes de roches désignent généralement des volumes de l'ordre du dm^3 et les chutes de blocs des volumes de l'ordre du m^3 .



Figure 5 : Versant rocheux fracturé à Conflans-Sainte-Honorine (78)

(Source : Photothèque INERIS)

3.1.4 ALEA LAVES TORRENTIELLES

Les laves torrentielles sont déclenchées en général à l'occasion de pluies intenses, générant des écoulements capables de mettre en mouvement de grandes quantités de matériaux non consolidés (boue, blocs rocheux, débris divers, etc.). Le volume de ces écoulements est constitué de plus de 50 % de matériaux solides de différentes tailles, des matériaux fins jusqu'à des blocs de plusieurs mètres cube (Figure 6). Les laves torrentielles peuvent être très destructrices, même lorsqu'elles sont relativement lentes.



Figure 6 : Laves torrentielles puissantes à Pinsot en 2008 (Isère, 38)

(Source : <http://www.sentier-nature.com/montagne/post/2008/09/16/162-qleyzin-oule-leat>)

3.2 CRITERES DE STABILITE

3.2.1 PARAMETRES INFLUENÇANT L'ALEA

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).

Comme évoqué dans le paragraphe 2.1, les paramètres influençant l'aléa dépendent largement du type de phénomènes décrits.

Les paramètres influençant l'aléa glissements de terrain (profonds ou superficiels) et l'aléa laves torrentielles sont les suivants (Bastone et De la Torre, 2011) :

- la géologie : l'altération du matériau, ses caractéristiques mécaniques, sa perméabilité qui conditionnent la pente limite d'équilibre d'un terrain et donc la probabilité d'occurrence de désordres ;
- la morphologie : l'angle de la pente va influencer sur la possibilité d'apparition de phénomènes lents ou au contraire rapides ;
- la nature et l'importance du couvert végétal : ils conditionnent la stabilité, le déclenchement et la propagation des phénomènes de glissement. Le couvert végétal a un rôle soit positif (renforcement de la cohésion des sols par le système racinaire) ou négatif (effet de levier sous l'effet du vent, infiltrations d'eau) ;
- l'eau, qui représente un élément moteur prépondérant des instabilités par le biais des phénomènes d'infiltration, des écoulements en surface et des épisodes pluvieux.

Les paramètres influençant l'aléa chutes de blocs, éboulements et écroulements sont les suivants (Bastone et De la Torre, 2011) :

- la géologie : contraste de compétence avec une formation sous-jacente plus meuble, déformable ou érodable, présence fréquente de discontinuités structurales (diaclasses, joints, intrusions), etc. ;

- la morphologie ;
- la croissance de la végétation (actions du système racinaire dans les fissures) ou effet balancier (solicitation sous l'action de vents violents) ;
- l'action mécanique de l'eau (augmentation de la pression hydrostatique due à l'infiltration d'eau dans les fissures, ravinement superficiel) ;
- les sollicitations cycliques (vent, chocs thermiques) sur une très longue durée provoquant une « fatigue » du matériau et favorisant une baisse de sa résistance.

3.2.2 COEFFICIENT DE SECURITE

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. Il peut être calculé, en l'absence de la cohésion, par la formule suivante (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{\tan \Phi'}{\tan i} \quad [1]$$

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. Si F est supérieur à 1 la stabilité est garantie mais s'il est inférieur à 1 la stabilité n'est pas assurée. Généralement, une marge de sécurité est ajoutée selon le cas considéré, permettant de considérer une stabilité avérée pour un coefficient de sécurité de 2.

Quand de l'infiltration est impliquée, F est exprimé pour un sol saturé à infiltration parallèle à la pente (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{\gamma_b (\tan \Phi')}{\gamma_{sat} \tan i} \quad [2]$$

où γ_b le poids volumique du sol immergé et γ_{sat} est le poids volumique du sol saturé. Ces équations, cependant, ne sont valables que pour des pentes récemment formées qui manquent de cohésion. En réalité, la terre la plus naturelle a une cohésion apparente. La cohésion est généralement causée par la cimentation ou les effets du vieillissement.

Pour une pente formée avec un sol cohérent, F augmente en raison de la cohésion (Bo et al., 2008) :

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

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, par exemple à la suite de la dessiccation du sol ou des effets du gel saisonnier, de nombreux sols perdent leur cohésion et l'équation (3) remonte à l'équation (1).

Lorsque des forces d'infiltration sont impliquées plus en profondeur sous la pente, le coefficient de sécurité F se calcule selon l'équation suivante (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{A \tan \phi'}{\tan i} + B (c'/\gamma H) \quad [4]$$

où A est compris entre 0 et 1 en fonction des valeurs de R_u et du ratio de la pente, où R_u est le ratio de la pression interstitielle (prenant en compte la mesure de la hauteur de la nappe phréatique à l'intérieur de la pente, R_u est égal à 1 pour un sol parfaitement saturé).

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. Lorsque la succion du sol intervient à la suite d'un sol partiellement saturé, F augmente selon l'équation ci-dessous (Bo et al., 2008) :

$$F = \frac{\tan \phi'}{\tan i} + B (c/\gamma H) \quad [5]$$

où c est la cohésion totale, qui comprend deux composantes, la cohésion apparente c' et le paramètre de succion matricielle $(u_a - u_w) \tan \phi_b$. Dans ce cas, u_a est la pression d'air des pores, u_w est la pression de l'eau interstitielle et ϕ_b 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 4.

Lorsque les pentes naturelles du sol ont un couvert végétal, les racines servent de renfort et F augmente de nouveau (Bo et al., 2008).

$$F = \frac{\tan \phi'}{\tan i} + B (c_1/\gamma H) \quad [6]$$

où c_1 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. 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, poids volumique, etc.) ;
- eau (saturation, cohésion, nappe souterraine, succion, pression interstitielle, etc.) ;
- couvert végétal.

3.3 PHENOMENE D'ALTERATION : CAS PARTICULIER D'UNE ROCHE CALCAIRE

Pour une falaise rocheuse instable, des processus d'altération peuvent se rajouter aux paramètres influençant l'aléa chute de bloc. Le cas particulier d'une roche calcaire sera considéré ici parce qu'il est représentatif de l'ensemble des mécanismes

qui peuvent se produire. Nous distinguerons l'altération chimique et physico-mécanique.

3.3.1 PROCESSUS D'ALTÉRATION

Le premier processus d'altération chimique est la dissolution : l'attaque du calcaire (roches carbonatées) par l'action d'eaux acides, issues des précipitations. Plus l'eau contient du dioxyde de carbone dissous (CO_2), plus la solubilité est forte. L'eau capte le CO_2 de l'air mais surtout s'enrichit en CO_2 quand elle percole à travers les sols : les racines des plantes, les micro-organismes du sol et la décomposition de matière organique contribuent grandement à cet enrichissement en CO_2 dissout. Ainsi, les principaux facteurs rendant une eau « agressive¹ » sont (Saad, 2012) : l'abondance de l'eau disponible (et surtout son renouvellement) ; la présence d'un couvert végétal dense et un temps de contact important eau-roche carbonatée (manteaux neigeux, forte porosité, etc.).

Le second processus d'altération chimique est la corrosion de la roche par des organismes biologiques. Apportés par le vent et l'eau, ils produisent une désagrégation et une microdivision de la surface du massif ainsi qu'une attaque chimique par sécrétion d'acide oxalique produit par certains végétaux (Saad, 2012). Cependant, ils peuvent aussi former une couche protectrice en limitant les contacts avec d'autres facteurs d'altération, telles que les précipitations.

Il existe aussi plusieurs processus d'altération physico-mécanique (Saad, 2012) :

- la dilatation hydrique (gonflement) : fatigue de la roche due aux fortes variations du degré de saturation suite à des cycles de saturation-séchage entraînant un phénomène de dilatation/contraction du matériau (important qu'en présence d'argile) ;
- la dilatation thermique : fatigue de la roche due aux fortes variations thermiques suite à des cycles thermiques nombreux et de grandes amplitudes (dilatations/contractions micrométriques du matériau) ;
- la gélivation : action du gel sur les massifs rocheux pour les sites où il y a de l'eau et des températures négatives (expansion volumique lors de la transition eau-glace, circulation d'eau surfondue, effets d'interface entre les zones gelées et celles non-gelées, cycle de gel-dégel journalier et saisonnier) ;
- la cristallisation des sels : le sel cristallise dans les pores de la roche et cause des contraintes à l'intérieur du réseau poreux ;
- l'activité biologique : des racines peuvent se développer dans les fractures du massif et en grandissant exercer une contrainte mécanique.

3.3.2 FACTEURS D'ALTÉRATION

Les facteurs d'altération constituent les éléments qui initient les phénomènes d'altération décrits ci-dessus en les accentuant ou en les diminuant. Nous pouvons en distinguer de deux types (Saad, 2012) : les facteurs climatiques induits par le climat (la température, les précipitations, l'humidité, l'ensoleillement et le vent) et les facteurs de sites liés aux conditions de terrain (l'altitude, l'orientation du massif, la composition de la roche, les propriétés hydrauliques des fractures, etc.).

¹ Capacité de l'eau à pouvoir dissoudre du carbonate de calcium.

3.4 CONCLUSION

Le changement climatique peut impacter directement les facteurs climatiques et indirectement les facteurs de site qui peuvent avoir des conséquences défavorables par rapport aux différents formes d'instabilité des falaises.

Dans la suite, le rapport se concentra en priorité sur les facteurs climatiques même si certains paramètres propres au site seront décrits sans toutefois les détailler.

En outre la stabilité d'un versant va dépendre des trois milieux en présence à savoir le sol, la roche et les discontinuités. Pour le sol et la roche, les phénomènes de modification des propriétés mécaniques seront plutôt rapides et dynamiques alors que pour les discontinuités ils seront plutôt complexes et lents.

4. IMPACTS DES PARAMETRES CLIMATIQUES SUR LA STABILITE DES VERSANTS ET DES FALAISES NATURELS

En raison du changement climatique, la température moyenne, la précipitation, le vent et le type de végétation peuvent changer. Pour les pentes naturelles du sol, ces changements peuvent entraîner la perte de certaines forces de résistance présentes et engager des forces motrices supplémentaires. Lorsque les conséquences du changement climatique réduisent les facteurs de sécurité, des glissements de terrain peuvent en résulter.

4.1 IMPACT DES PRECIPITATIONS

4.1.1 VERSANT NATUREL

Comme décrit au 1.2.2, les experts prédisent que le changement climatique entraîne une augmentation des précipitations. Le schéma ci-dessous montre les différents mécanismes de répartition de l'eau selon la perméabilité du sol en présence (Figure 7).

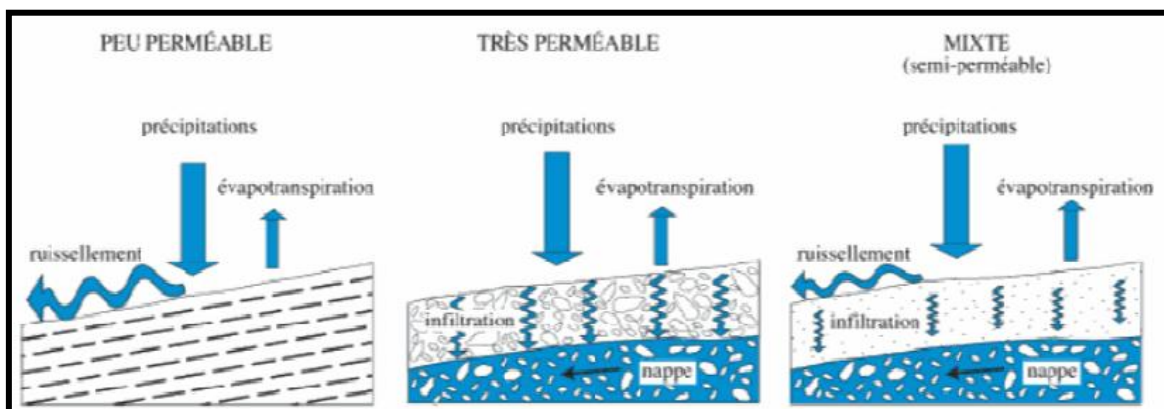


Figure 7 : Répartition de l'eau de surface et l'eau souterraine en fonction de la perméabilité du massif

(Source : Saad, 2012)

Un des effets de l'augmentation des précipitations va être une augmentation du niveau des nappes phréatiques (Bo et al., 2008). Cela conduira à une réduction de la contrainte effective 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 remplacerait 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 flux 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 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.

Un autre impact de la montée des eaux est de rendre sensible à la liquéfaction, notamment d'origine sismique, une zone meuble à l'intérieur ou en dessous d'une pente (Bo et al., 2008). Dans le cas d'un tremblement de terre, une perte importante de la résistance du sol peut être ainsi entraînée, déclenchant un glissement de terrain.

4.1.2 FALAISE ROCHEUSE CALCAIRE

Les précipitations jouent un rôle fondamental dans les processus d'altération chimique. La dissolution va augmenter à cause des précipitations plus importantes chargées en CO₂ de l'atmosphère. Les fortes précipitations vont initier un lessivage plus important et les faibles précipitations sur une longue période de temps vont permettre une meilleure infiltration de l'eau dans la roche. La présence d'un manteau neigeux va augmenter le contact entre l'eau et le massif favorisant la dissolution (Saad, 2012). L'eau apportée par les précipitations favorise le développement des organismes biologiques et leur distribution spatiale. L'altération chimique de la roche en sera donc impactée.

Concernant l'impact sur l'altération physico-mécanique, les précipitations plutôt faibles auront un effet positif car elles s'infiltreront mieux dans le réseau poreux.

La gélivation va être accentuée. Saad (2012) mentionne à ce sujet l'expérience de Bousquié (1979) qui a étudié le nombre de cycles de gel-dégel avant rupture en fonction du degré de saturation. 17 calcaires différents ont subi des cycles de gel-dégel à deux états de saturation différents : 11 (sur 17) de ces calcaires se fracturent au bout de moins de 5 cycles après saturation sous vide alors que 16 (sur 17) mettent plus de 60 cycles à se fracturer après saturation par imbibition. Plus une roche est saturée moins elle résistera longtemps à la gélivation.

Les précipitations ont aussi un rôle sur le degré de saturation du massif, elles participent donc à l'altération par dilatation hydrique. Cette valeur de l'humidité relative est liée à la température. Ce sont donc ces deux paramètres qui conditionnent la dilatation hydrique (Saad, 2012).

D'autre part, les précipitations jouent un rôle indirect dans la dilatation thermique. En effet, les précipitations conditionnent en grande partie le degré de saturation du massif, or la conductivité thermique du massif varie avec le degré de saturation. Les variations de températures dans le massif vont donc être influencées par les précipitations.

Les précipitations peuvent aussi apporter des sels dans le massif, particulièrement en zone polluée ou côtière. Elles peuvent donc être à l'origine de l'altération par cristallisation des sels. La solubilité des sels dépend de l'humidité relative et de la température. L'état du sel (dissout ou cristallisé) résulte donc de l'humidité qui aura par ce biais une influence sur l'altération par cristallisation des sels (Saad, 2012).

Ainsi, une baisse (ou une hausse) des précipitations en hiver et donc une baisse (ou une hausse respectivement) du degré de saturation pourrait diminuer (ou aggraver respectivement) les effets de gélivation pour les calcaires dont le degré de saturation diminuerait en-dessous du degré de saturation critique (augmenterait au-dessous du degré de saturation critique respectivement) pendant la période hivernale (Saad, 2012). Concernant le temps de percolation, une augmentation des précipitations favorise le ruissellement et donc la diminution du temps de contact entre l'eau et la roche et donc une diminution des effets liés à la dissolution.

4.2 IMPACT DES TEMPERATURES

4.2.1 VERSANT NATUREL

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).

4.2.2 FALAISE ROCHEUSE CALCAIRE

L'altération chimique et notamment la dissolution est impactée par les variations de température et d'ensoleillement. Une température élevée augmente la vitesse de réaction chimique et une température basse augmente la solubilité du CO₂ dans l'eau, ce qui conditionne la quantité de calcite pouvant être dissoute (Saad, 2012).

L'activité biologique est aussi impactée. La distribution géographique des organismes est modifiée, particulièrement en période estivale (où les températures sont élevées) mais aussi pendant la journée en hiver (Saad, 2012).

La température agit sur l'altération physico-mécanique (Gunzburger et al., 2004) par le biais de la gélivation en influençant la vitesse de refroidissement, la durée de gel et la température minimale atteinte. L'ensoleillement va avoir deux effets contradictoires : d'une part, favoriser les variations de température importantes entre le jour et la nuit et donc augmenter le nombre de cycles de gel-dégel et d'autre part, il va diminuer le degré de saturation du massif par évaporation et donc diminuer les effets de la gélivation (Saad, 2012).

Concernant la dilatation thermique de la roche, l'augmentation de la température va augmenter l'amplitude des cycles de dilatation thermique. Toutefois, elle va aussi diminuer le degré de saturation du massif par évaporation et donc diminuer la conductivité thermique du massif et ainsi les effets de la dilatation thermique.

La cristallisation des sels est liée à l'évaporation, accentuée par l'augmentation de la température. L'évaporation accentue l'altération du massif par cristallisation des sels (Saad, 2012).

Enfin, la température est intrinsèquement liée à l'humidité relative de l'air, elle va donc avoir une influence sur la dilatation hydrique du massif. L'exposition au soleil est donc un facteur d'altération du massif par dilatation hydrique (Saad, 2012).

Ainsi, l'augmentation de la température et de l'ensoleillement entraîne une augmentation de la température de la roche et une diminution du degré de saturation, et inversement. 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 entraîner l'apparition de cycles de gel-dégel (Figure 8). 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.

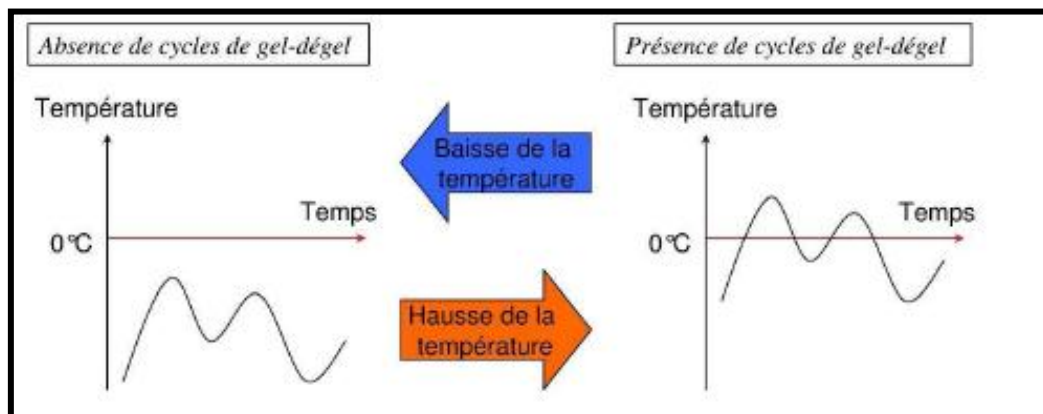


Figure 8 : Influence de la température sur les cycles de gel-dégel

(Source : Saad, 2012)

4.3 IMPACT DE LA VEGETATION

La végétation affecte de manière significative la stabilité des pentes naturelles sous plusieurs aspects (Bo et al., 2008) :

- les racines fournissent une force de renfort notamment pour le sol superficiel ;
- comme les racines des arbres absorbent l'eau, la succion du sol dans le sol, bénéfique pour la stabilité, est maintenue ou augmentée dans les sols proches de la surface ;
- la disparition de la végétation et donc des racines en raison des températures plus élevées ou de l'enlèvement anthropique de la végétation nuit généralement à la stabilité ;
- les arbres massifs qui sont exposés au vent transfèrent les forces du vent au sol par leur racines et ont des impacts négatifs sur la stabilité des pentes ;
- le feuillage intercepte les précipitations, causant des pertes d'absorption et d'évaporation, tout en augmentant le taux de ruissellement, et en réduisant l'infiltration. Une perte de végétation peut donc entraîner une augmentation de l'infiltration, une perte associée de succion et une augmentation préjudiciable de la nappe d'eau souterraine ;
- les racines permettent la cohésion des particules de sol en réduisant leur susceptibilité à l'érosion. Une perte de végétation contribue par conséquent à l'érosion superficielle avec des augmentations associées d'infiltration d'eau ;
- le poids des arbres sur une pente raide, si l'effet de succion du sol et les racines ne sont pas présentes, a un impact négatif sur la stabilité ;
- les changements dans la végétation peuvent réduire ou augmenter la perméabilité des sols près de la surface. Une augmentation de la perméabilité

du sol faciliterait l'infiltration d'eau parallèle à la pente et réduirait le coefficient de sécurité de la pente.

Ainsi, la végétation a généralement des effets plus positifs que négatifs. 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.

4.4 IMPACT DU VENT

Les effets du vent sur la stabilité des pentes se produisent de deux façons (Bo et al., 2008). Indirectement, ils affectent la végétation et donc la stabilité des pentes, comme indiqué ci-dessus. Cela peut conduire la végétation à disparaître par l'humidité réduite, et aussi à augmenter les risques d'incendie.

La charge latérale sur les arbres en raison de forts vents de tempêtes est un autre effet sur la stabilité de la pente lorsque la direction du vent est en pente descendante.

Concernant le versant rocheux (Saad, 2012), le vent influence la température de la roche et le degré de saturation. Le vent peut diminuer la température de la roche ou favoriser l'évaporation impliquant une diminution du degré de saturation. Cela influencera les effets de la gélivation.

4.5 AUTRES PARAMETRES : FACTEURS PROPRES AU SITE

4.5.1 L'ALTITUDE

Plusieurs paramètres physiques varient en fonction de l'altitude : diminution de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité, augmentation de l'ensoleillement, raréfaction de la végétation (Saad, 2012).

4.5.2 L'ORIENTATION

L'orientation du massif, associée à l'ensoleillement, engendre des zones d'ombre (ubacs) et des zones ensoleillées (adrets). Elle favorise donc les gradients de température, les variations de température et l'évaporation (Saad, 2012).

4.5.3 LES CARACTERISTIQUES DE LA ROCHE

Les caractéristiques de la roche sont multiples : composition minéralogique, présence d'argiles, propriétés hydrauliques, propriétés thermiques, résistance mécanique, propriétés physiques, etc.

Les propriétés hydrauliques ont un impact sur le degré de saturation du massif et donc sur l'altération par activité biologique (les racines ont besoin d'eau pour se développer). Les propriétés thermiques se mesure globalement par la conductivité thermique qui a un impact sur la température à l'intérieur du massif rocheux et donc sur les phénomènes d'altération qui sont liés à la température (Saad, 2012).

La composition minéralogique de la roche va avoir un rôle dans l'altération par dissolution car la solubilité des minéraux est variable. Les caractéristiques de la roche ont aussi un rôle dans tous les processus d'altération physico-mécanique (Saad, 2012).

4.5.4 LES CARACTERISTIQUES DES FRACTURES

Les fractures ont leurs propres propriétés hydrauliques qui sont bien plus élevées que celles de la roche. Des gradients au niveau du degré de saturation du massif vont être créés entre les zones fracturées et les zones non fracturées. Les fractures ont aussi une résistance mécanique différente de la roche en principe plus faible (Saad, 2012). Toutes ces caractéristiques vont influencer les phénomènes d'altération particulièrement ceux pour lesquels le degré de saturation joue un rôle (dissolution, activité biologique, gélivation...).

4.5.5 LE FACTEUR HUMAIN

Il convient de ne pas négliger le facteur humain qui risque d'accentuer l'impact naturel. Par exemple, il peut avoir un impact sur les aquifères par l'utilisation de plus en plus d'eaux souterraines pour subvenir aux besoins de la population en période de sécheresse prolongée (Didier et al., 2010). De même, Huggel et al. (2011) soutient que le développement socio-économique futur aura un effet plus important sur les glissements de terrain que l'effet du changement climatique. Huggel et al. (2011) cite Petley (2010) qui a réalisé une étude en Asie sur la fréquence des glissements de terrain. Il conclut qu'en Asie du sud-est, bien que la mousson d'été et les cyclones tropicaux soient des déclencheurs climatiques importants des glissements de terrain, la croissance de la population est le principal moteur de l'augmentation des glissements de terrain destructeurs et mortels. En outre, ces deux facteurs peuvent être liés : le changement climatique peut entraîner des changements anthropiques et inversement.

La topographie locale peut donc changer considérablement au cours des années en raison de l'apport anthropique ou de phénomènes naturels comme le rétrécissement des glaciers ou encore des glissements de terrain passés (Huggel et al., 2012).

4.6 SENSIBILITES DES DIFFERENTS ALEAS AUX PARAMETRES CLIMATIQUES

4.6.1 SENSIBILITE DE L'ALEA GLISSEMENT SUPERFICIEL

Une augmentation des précipitations intenses va provoquer des pics de pressions interstitielles défavorables à la stabilité superficielle du versant. Sa réponse dépendra des caractéristiques d'infiltration propres à chaque site.

En cas d'augmentation des températures, une recolonisation des talus d'éboulis est possible à cause de périodes végétatives plus longues. D'un côté, la revégétalisation améliorerait la cohésion de ces versants et de l'autre cette stabilisation pourrait être freinée par l'arrivée d'espèces acidifiantes qui risquent de limiter l'implantation d'autres espèces au système racinaire plus développé (Prudent, 2008).

La multiplication des feux de forêts, prévue par certains scénarios de changement climatique, peut favoriser le déclenchement des glissements superficiels sous deux aspects : la destruction de la protection végétale (système racinaire) et la présence de cendres et charbons qui ont un effet lubrifiant et favorise l'érosion. Les sols ainsi mis à nu sont d'autant plus sensibles au caractère agressif des fortes précipitations (ONERC, 2008).

Bo et al. (2008) ont analysé, à l'aide de la modélisation prédictive, les pentes caractérisées par des zones de défaillances peu profondes (quelques mètres de profondeur). Le logiciel utilisé détermine l'équilibre limite en intégrant des modes de rupture circulaire. Les données suivantes ont été considérées : pente comprise entre 30 et 60 degrés, angle de friction de 30 degrés (typique de sable meuble et limons ou de faibles argiles plastiques), cohésion à la racine de 1 kPa, niveau de la nappe

phréatique au pied de la pente, succion du sol entre 0 kPa au niveau hydrostatique et -285 kPa à la surface du sol et un angle de frottement par rapport aux changements de succion matricielle de 15 degrés. Les résultats confirment des réductions significatives de stabilité, comme indiquée par la baisse des valeurs des facteurs de sécurité, en raison principalement de la perte de la végétation, de la diminution de la succion du sol, ainsi que d'une montée de la nappe phréatique.

4.6.2 SENSIBILITE DE L'ALEA GLISSEMENT PROFOND

Une modification marquée de la pluviométrie pourrait avoir des conséquences sur l'activité des glissements profonds. La pluviométrie influe sur l'infiltration profonde et les eaux souterraines, paramètres clés à l'origine des glissements profonds (Rathnaweera et al., 2012).

Le cas particulier de versants dont la stabilité est contrôlée par de l'érosion en pied semblerait être plus sensible à l'évolution des écoulements de surface liés aux précipitations intenses (ONERC, 2008).

4.6.3 SENSIBILITE DE L'ALEA EBOULEMENT ET CHUTE DE BLOCS

La réponse des pentes rocheuses aux fluctuations climatiques diffère quelque peu de celle du sol. Le degré de fracturation des roches a un effet important sur la capacité d'infiltration, ce qui affecte la pression hydrostatique issue de la hauteur verticale de la zone saturée interconnectée. Des mesures piézométriques dans des pentes rocheuses montrent que les eaux souterraines ne sont pas nécessairement hydrostatiques. La répartition spatiale des pressions varie fortement avec la structure de la roche (Huggel et al., 2012). Cependant, aucune corrélation entre l'augmentation des précipitations et les chutes de blocs n'a été établie par les observations sur site. Par contre, il a été démontré le lien entre les éboulements ou les chutes de blocs et les jours affectés par des cycles de gel/dégel. Il est vrai que lors de la canicule de 2003, de nombreuses chutes de blocs ont été observées en haute montagne. Il est raisonnable de supposer que l'eau de fonte due à des températures élevées infiltrée dans des fractures, le dégel des fissures gelées par advection de chaleur et l'augmentation des pressions hydrostatiques réduiraient la résistance au cisaillement (Huggel et al., 2012). De l'eau fondue peut également pénétrer à la base des glaciers escarpés et réduire la résistance à la rupture. Il semblerait que la température pourrait jouer un rôle dans la propagation ou la réactivation des fissures au sein de la masse rocheuse, comme le suggère les résultats de certaines modélisations (Gunzburger et al., 2004).

Une multiplication des feux de forêts dans le cadre du changement climatique serait un facteur aggravant. La disparition du couvert végétal influencerait sur le départ de chutes de blocs (contraintes thermiques et moindre maintien par les racines) et sur leurs distances d'arrêt (diminution du rôle d'écran protecteur des forêts).

4.6.4 SENSIBILITE DE L'ALEA LAVES TORRENTIELLES

L'occurrence des précipitations intenses et la disponibilité en matériaux mobilisables sont les deux principales composantes des laves torrentielles qui peuvent être affectées par un changement climatique (ONERC, 2008). Deux principaux types de situations sont susceptibles de déclencher des aléas torrentiels :

- les orages de printemps / début d'été (mai, juin et juillet) avec des événements localisés assez brefs (1 à 4 heures) mais pendant lesquels les sols sont encore humides ;

- les épisodes généralisés d'automne (fin août, septembre, octobre) qui tombent sur un sol plus sec, mais avec des intensités plus fortes et des durées intenses plus longues (6 à 18 heures).

Tous les phénomènes générateurs de laves torrentielles sont potentiellement influencés par le changement climatique, que ce soit par les changements de cycles gel/dégel, les changements de saisonnalité et de fréquence des précipitations intenses, les changements de régime des glaciers ou les changements en disponibilité des matériaux mobilisables pour des laves torrentielles (ONERC, 2008). Cependant, les laves torrentielles sont des phénomènes qui présentent de très fortes variabilités spatiale et temporelle, rendant difficile la perception des effets du changement climatique sur ces phénomènes.

5. PARTICULARITES LIEES AUX MILIEUX SENSIBLES

5.1 MILIEU MONTAGNARD

Le milieu montagnard diffère principalement des autres milieux par la présence d'eau solide sous forme de glace plus ou moins permanente ou de chute massive de neige. De nouveaux phénomènes apparaissent, sensibles au changement climatique et susceptibles d'engendrer d'autres facteurs déclenchant de mouvements de terrain liés aux versants naturels instables.

5.1.1 ALEAS GLACIAIRES

5.1.1.1 VIDANGE DE LAC GLACIAIRE

Lorsque le front du glacier avance ou recule, des retenues naturelles peuvent se former et mener à la formation de lacs. Ces barrages naturels sont faits de matériaux hétérogènes avec une cohésion limitée. Ils peuvent facilement se rompre, déclenchant des inondations significatives par vidange du lac et des laves torrentielles en aval. Les conditions climatiques et la dynamique des glaciers expliquent la formation des lacs glaciaires (ONERC, 2008).

Des hypothèses proposent qu'un réchauffement du climat (avec comme conséquences des précipitations intenses en altitude et un retrait glaciaire accéléré) pourrait conduire à une augmentation potentielle de la formation de tous les lacs glaciaires, sans distinction. Mais ces conjectures sont encore peu argumentées (ONERC, 2008).

5.1.1.2 POCHES D'EAU GLACIAIRE

Les poches d'eau glaciaires peuvent être soit intraglaciaires (c'est-à-dire dans l'épaisseur du glacier), soit subglaciaires (c'est-à-dire entre le glacier et le socle rocheux) (Figure 9). Les mécanismes qui régissent la formation et la rupture des poches d'eau glaciaires (intraglaciaires ou subglaciaires) sont actuellement inconnus (ONERC, 2008). Il est donc impossible d'évaluer leur évolution au changement climatique.

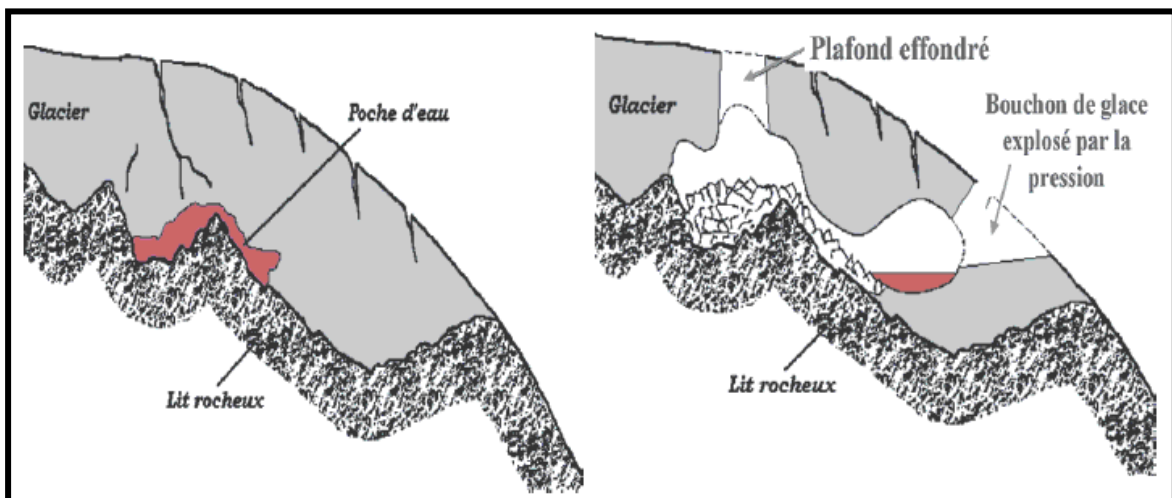


Figure 9 : Formation et rupture d'une poche d'eau

(Source : Bidalot, 2006)

5.1.1.3 CHUTE DE SERACS

Une chute de séracs (ou « avalanche de glace ») est la chute de blocs de glace se détachant du glacier et tombant dans la pente en aval, se fracturant en plus petits blocs. C'est un phénomène normal et relativement fréquent. Il est influencé par la dynamique du glacier et donc par les paramètres climatiques (Bidalot, 2006).

Comme déjà observé en Suisse, l'augmentation de la température modifierait la répartition spatiale des chutes de séracs. De nouvelles zones de détachement de séracs se développeraient à des altitudes plus élevées qu'auparavant. Cependant, dans les zones actuelles d'observation de chute de séracs, elles ne devraient pas être plus fréquentes qu'auparavant du fait de la diminution du volume des glaciers. Les glaciers suspendus pourraient présenter des dangers s'ils passent d'un mode froid à un mode tempéré. En effet, il pourrait y avoir une augmentation des fréquences des chutes de séracs, mais surtout des volumes de chaque événement, voire même des chutes de portions importantes de glaciers suspendus (ONERC, 2008).

5.1.1.4 DEGRADATION DU PERGELISOL

Le pergélisol est la partie de la lithosphère gelée en permanence. C'est un des éléments les plus importants de la cryosphère et il couvre près de 1/5 de la surface terrestre. En général, il se forme lorsque la température moyenne annuelle est inférieure à -2°C , et que le froid peut ainsi pénétrer parfois, sur plusieurs dizaines de mètres, contrecarrant le flux de chaleur géothermique issu du centre de la terre. En été, une fonte temporaire de la partie supérieure du pergélisol est possible (Bidalot, 2006). Celle-ci nommée couche active peut dégeler sur plusieurs mètres. Le pergélisol se compose d'un mélange de glace et de roches. Il peut se mettre en mouvement lent si la pente le permet et se caractérise par une absence de végétation et des bourrelets (Figure 10).



Figure 10 : Zone de pergélisol

(Source : Bidalot, 2006)

La disparition du manteau neigeux qui isole le pergélisol de la chaleur estivale entraîne une fonte de celui-ci et expose la roche à la pénétration d'eau liquide et aux phénomènes de gélifraction, entraînant une augmentation des chutes de pierres (Huggel et al., 2011). Bidalot (2006) mentionne l'éboulement de l'arête du Hörnli

(Cervin, Alpes) du 15 juillet 2003 entraînant l'évacuation de 90 alpinistes. Il s'est déclenché dans le pergélisol en raison d'une couche active plus importante, de la température élevée de la glace dans les fissures et des eaux de fonte qui y circulaient. Le pergélisol peut aussi agir comme une barrière hydraulique qui favorise l'élévation de la pression interstitielle dans la couche active (Huggel et al., 2012).

5.1.2 PRINCIPAL PARAMETRE CLIMATIQUE INFLUENÇANT L'ALEA : LA TEMPERATURE

Pour définir l'évolution d'un glacier, on mesure son avancée ou son recul ainsi que les fluctuations de son bilan de masse (différence entre l'accumulation de neige et l'ablation de glace et de neige). On peut ainsi connaître l'équilibre entre l'accumulation des précipitations hivernales et le flux d'énergie (température, insolation, précipitation liquide et humidité) entraînant la fonte du glacier pendant la saison estivale (Bidalot, 2006).

Depuis 1982, les bilans de masse sont très déficitaires. Cette forte régression est due à l'augmentation des chaleurs estivales causée par l'élévation des températures. A titre d'exemple, entre 1954-1981 et 1982-2000, la fonte estivale moyenne à 2800 m d'altitude est passée de 2.1 m à 3.1 m de glace (Bidalot, 2006). De plus, le phénomène d'albédo (rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface à l'énergie solaire incidente) accélère le processus d'ablation des glaciers. Si la neige renvoie entre 60 et 90 % de l'énergie du rayonnement solaire, la glace vive quand à elle n'en renvoie que 30 à 40 %. Une fois la glace mise à nue, le processus d'ablation ira donc en s'accéléralant (Bidalot, 2006). D'autres facteurs aggravants sont le manque de regel nocturne l'été et des automnes particulièrement doux.

L'augmentation des températures sur les glaciers entraîne l'apparition des phénomènes gravitaires décrits ci-dessus.

5.2 MILIEU COTIER

Le milieu côtier se caractérise généralement par la présence de versants instables appelés berges. Sous l'effet de plusieurs facteurs extérieurs, ces berges peuvent devenir instables par érosion progressive. Les caractéristiques qui sont particulièrement regardées sont la géologie de la berge, la géométrie de la berge (hauteur et pente) et l'action mécanique du cours d'eau (débit liquide et débit solide) qui s'écoule à son pied (Bastone et De la Torre, 2011).

5.2.1 ALEAS COTIERS

5.2.1.1 EROSION COTIERE

Il s'agit du recul du trait de côte par le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. C'est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, combinée parfois à des actions continentales. On distingue deux types d'érosion (Bastone et De la Torre, 2011) :

- l'érosion des côtes à falaises issue de l'action mécanique des vagues qui, du fait de la sollicitation du pied de falaise par les galets et les phénomènes de compression et décompression, sont responsables d'un sous-cavage pouvant entraîner des éboulements massifs (Figure 11) ;
- l'érosion des côtes basses (plage ou galets) résultant d'un déficit sédimentaire correspondant au bilan entre les apports de sédiment venant de la côte et des pertes issues principalement de l'action des vagues et du vent (Figure 12).



Figure 11 : Falaises à proximité d'Etretat en Seine Maritime (76)

(Source : Photographie de C.Gladek)



Figure 12 : Plage à galets à proximité d'Etretat en Seine Maritime (76)

(Source : Photographie de C.Gladek)

5.2.1.2 SUBMERSION MARINE

Il s'agit d'inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans les conditions météorologiques extrêmes. L'eau atteint généralement les terrains situés en dessous du niveau des plus hautes mers, mais aussi parfois au-dessus si des projections d'eaux marines franchissent le cordon sédimentaire ou des ouvrages de protection. Les submersions marines exigent un niveau extrême de la mer provoqué par la conjugaison d'un ou plusieurs phénomènes suivants (Figure 13) :

- la marée astronomique ;
- la surcote météorologique ou atmosphérique : la chute de la pression entraîne une augmentation du niveau du plan d'eau et le vent génère des courants dans la masse d'eau poussant l'eau dans certaines zones ;

- la surcote liée aux vagues : les vagues transfèrent leur énergie provoquant une élévation du niveau de l'eau ;
- le jet de rive : le flux et le reflux des vagues sur la plage ou tout autre plan incliné (talus de digue par exemple).

La part relative de la surcote atmosphérique et de la surcote associée à la houle dans la surcote totale est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré.

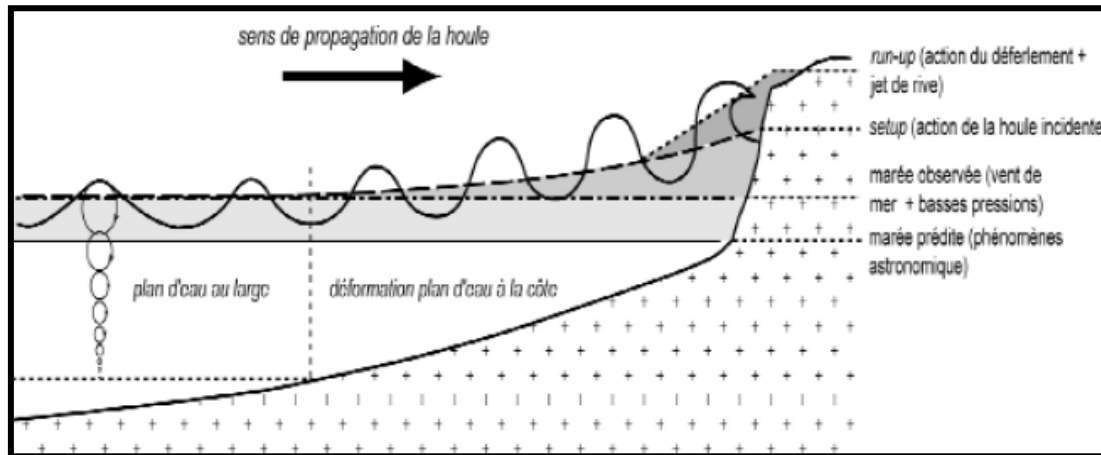


Figure 13 : Les différentes modes de submersion marine

(Source : Bastone et De la Torre, 2011)

5.2.2 PARAMETRES CLIMATIQUES INFLUENÇANT LES ALEAS

5.2.2.1 LE VENT

Le vent peut avoir un impact direct sur la berge (enlèvement de particules, mis à mal de la végétation de la berge entraînant sa déstabilisation) mais aussi un impact indirect par le biais de l'augmentation de l'intensité des vagues ou de la houle. Les phénomènes extrêmes comme les tempêtes ou les cyclones modifient grandement le paysage (Bastone et De la Torre, 2011).

5.2.2.2 L'HYDRODYNAMIQUE MARINE

La houle se caractérise par un sens de propagation (vers la berge), une intensité et une fréquence. On distingue les houles d'alizés (période entre 9 et 12 secondes et hauteur moyenne de 2 m), les houles australes (période entre 12 et 20 secondes et hauteur moyenne de 3 à 4 m) particulièrement érosives et submersives et les houles cycloniques, concentrées sur quelques jours par an et pouvant atteindre 10 m de hauteur (hauteur moyenne entre 5 et 7 m).

La marée influence peu l'aléa car les variations du niveau de la mer qui en résultent sont relativement faibles (entre 0,10 et 0,90 m).

Enfin, les courants côtiers, liés soit à la houle soit à la marée peuvent jouer un rôle notable dans le transport sédimentaire contrairement aux courants océaniques qui ont des vitesses trop faibles pour influencer la dynamique côtière (Bastone et De la Torre, 2011).

5.2.2.3 L'HYDROLOGIE « CONTINENTALE »

L'hydrologie « continentale » permet les apports sédimentaires à la côte grâce au transport par ruissellement et écoulement du matériel détritique provenant de l'érosion des bassins versants (Bastone et De la Torre, 2011). La violence des précipitations, notamment en période cyclonique, combinée à l'encaissement des ravines, permet le développement de crues torrentielles favorables aux apports solides en mer (blocs, galets, sables).

5.2.2.4 LES EVENEMENTS EXTREMES

En cas de forte tempête ou de cyclone, la puissance des vents occasionnés favorise la perte de sable par arrachement de particules fines. Les vagues générées par les houles cycloniques attaquent directement le haut des plages en emportant d'importants volumes de sédiments mais aussi en favorisant le creusement des falaises. La surcote cyclonique engendre d'importante submersions marines et peut empêcher l'évacuation des rivières à la mer augmentant ainsi le risque d'inondation côtière (Bastone et De la Torre, 2011).

6. QUANTIFICATION DES IMPACTS

Le changement climatique peut affecter à la fois la fréquence et l'intensité des risques naturels (Bärring et Persson, 2006). Intéressons nous à chaque type de mouvements de terrain et voyons comment le changement climatique impacte l'intensité et la fréquence de l'aléa.

6.1 GLISSEMENTS DE TERRAIN SUPERFICIELS

6.1.1 EVOLUTION DE L'INTENSITE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Beaucoup d'hypothèses ont été faites mais aucune n'a été confirmée ou infirmée l'évolution de l'intensité en fonction du changement climatique (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).

6.1.2 EVOLUTION DE LA FREQUENCE 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). Alors que les seuils de précipitations sont un des moyens empiriques d'évaluation de glissement de terrain, la mécanique du sol et des roches fournit un cadre déterministe pour évaluer la stabilité de la pente sous les deux conditions sèches et humides (Huggel et al., 2012).

Huggel et al. (2012) a simulé les effets de deux scénarios climatiques par modélisation numérique. Compte tenu de la fréquence saisonnière de ces événements, le premier scénario caractérisé par des changements de température du sol montrait une extension de la "saison" des glissements de terrain, en particulier au printemps, un changement dans le pic d'activité des glissements de terrain au début de l'été et la fréquence des glissements de terrain légèrement plus élevée en hiver, selon les neiges éternelles et l'altitude du site. La fréquence cumulée des glissements de terrain restait environ similaire. Pour le deuxième scénario prenant en compte une augmentation combinée de la température moyenne et de l'intensité des précipitations, la distribution de fréquence des glissements de terrain saisonnière est semblable au premier scénario, mais avec une fréquence plus élevée de survenue de glissements de terrain.

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. La (re)végétalisation progressive de certains versants pourrait diminuer la fréquence des instabilités mais aucune hypothèse ne le confirme (Prudent, 2008).

6.2 GLISSEMENTS DE TERRAIN PROFONDS

6.2.1 EVOLUTION DE L'INTENSITE 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).

6.2.2 EVOLUTION DE LA FREQUENCE 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 supposée 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. Bien que le signal du changement climatique suggère quelques changements dans les périodes d'instabilité, il est probable, selon ces auteurs, que des facteurs tels que les changements d'utilisation des terres et les activités humaines auront un plus grand impact sur la fréquence des glissements de terrain que le changement climatique.

Toutefois, 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 de 3,5 à 4 ans à l'horizon 2080 en intégrant un scénario d'évolution des précipitations. 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.

Dans le cas de glissements préexistants, Dixon et Brook (2007) différencient les paramètres déclencheurs (par exemple des précipitations) et les facteurs préparatoires (par exemple, les conditions des eaux souterraines antécédentes), impactant tout deux l'équilibre évapotranspiration-précipitation. L'augmentation du niveau de la nappe phréatique et la pression des eaux souterraines sont des facteurs déterminants d'instabilité (Dixon et al., 2006). Par contre, il est impossible de déterminer l'influence de l'augmentation de la température en raison d'un manque de données historiques sur les paramètres clés qui sont nécessaires pour valider une modélisation. Cependant, 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.

6.3 EBOULEMENTS ET CHUTES DE BLOCS

6.3.1 EVOLUTION DE L'INTENSITE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

En milieu montagnard, il a été démontré que les variations de la température de surface augmentent le déplacement dans un massif rocheux (Gunzburger et al., 2004). Cependant, aucune étude n'a quantifié cet impact. L'augmentation de l'intensité des éboulements ou des chutes de blocs dans le cadre du changement climatique n'a pas encore été démontrée (ONEC, 2008).

6.3.2 EVOLUTION DE LA FREQUENCE 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.

Sass et Oberlechner (2012) montrent dans leur étude que la seule conclusion qu'il est possible de faire est qu'avec des étés plus chauds dans les décennies à venir, il est probable que la fréquence de chutes de pierres soit accrue dans les zones de pergélisol. Toutefois, dans les régions sans zone de pergélisol, des hivers plus doux vont probablement réduire le nombre de chutes de pierres.

Que l'augmentation des précipitations et donc des pressions interstitielles plus élevées contrecarrent cet effet n'est pas claire. Il est donc difficile de conclure sur l'évolution du nombre de chute de blocs ou d'éboulements dans les zones inférieures à la limite du pergélisol.

6.4 LAVES TORRENTIELLES

6.4.1 EVOLUTION DE L'INTENSITE FACE AUX PARAMETRES CLIMATIQUES

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 (même si de tels changements n'ont pas encore été observés).

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).

6.4.2 EVOLUTION DE LA FREQUENCE FACE AUX PARAMETRES CLIMATIQUES

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). Cependant, la fréquence des laves torrentielles pourrait augmenter dans certaines régions et diminuer dans d'autres en fonction des caractéristiques locales (altitude, présence de pergélisol, etc.).

6.5 MILIEUX SPECIFIQUES

6.5.1 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALEAS MONTAGNARDS

La fonte du pergélisol causée par l'augmentation des températures provoquerait la libération de volumes importants de matériaux ayant perdu la cohésion procurée par la glace (Huggel et al., 2011). En plus, si on considère l'augmentation prévisible des précipitations notamment sous forme liquide à haute altitude, il en résulte un lessivage de ces terrains meubles lors de fortes pluies, propice aux déclenchements de glissements de terrain ou à la formation de laves torrentielles dévastatrices (Bidalot,

2006). Cependant, il faut mentionner que l'arrivée plus tardive de la neige favorise la formation de pergélisol en exposant les sols au refroidissement hivernal et en ne créant pas une couche de neige isolante contribuant au réchauffement du pergélisol par le flux géothermique (Bidalot, 2006). Il semblerait que le premier effet en faveur d'une diminution du pergélisol soit prépondérant par rapport au deuxième effet contradictoire.

Malet et al. (2007) ont modélisé l'influence du changement climatique sur la fréquence des glissements de terrain en milieu montagnard en combinant la modélisation du climat, la modélisation des eaux souterraines et la modélisation de la stabilité des pentes. Les simulations indiquent :

- sur les pentes exposées au sud, une réduction drastique de l'instabilité des pentes pour les plans de rotation, associée à une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution conséquente de l'humidité du sol et de la porosité du sol dans la couche arable insaturée ;
- sur les pentes exposées au nord, l'influence du changement climatique pour les glissements de terrain se limite à une très petite réduction de l'instabilité des pentes. Cette situation s'explique par une petite variation dans le montant total des précipitations annuelles (par exemple, la diminution critique en profondeur de la neige observées en hiver semble être compensée par une augmentation des précipitations liquides).

Cette étude indique également que plus les mécanismes de glissements de terrain spécifiques au site sont détaillés plus il est possible de prévoir des scénarios fiables.

6.5.2 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALEAS COTIERS

Au vu des paramètres influençant l'aléa, l'érosion côtière va être impactée par le changement climatique sous au moins quatre aspects (Bastone et De la Torre, 2011) :

- l'élévation du niveau de la mer entraînera une aggravation du phénomène d'érosion : la houle atteindra des parties plus élevées du rivage, érodant des zones jusqu'alors épargnées. En outre, l'élévation du plan d'eau aura pour conséquence un amortissement des vagues plus faible avec ainsi davantage d'énergie sur le rivage causant de l'érosion ;
- l'augmentation des épisodes pluvieux extrêmes augmentera les infiltrations et donc la fragilisation des falaises littorales. Toutefois, elles permettront également d'augmenter les apports de sédiments sur la côte ;
- l'intensification des vents entraînera un renforcement de la houle cyclonique et de son action érosive, un renforcement de la dérive littorale, une augmentation de l'arrachement des particules et une fragilisation des roches constitutives des falaises ;
- la modification du régime des pluies aura une conséquence sur la croissance de la végétation protégeant les terrains littoraux.

De même, il faut s'attendre à ce que l'aléa submersion marine soit modifié par les effets du changement climatique. En effet, l'élévation du niveau de la mer liée à l'augmentation de la température de surface des océans et à la fonte des glaces entraînera la submersion temporaire de nouvelles zones et la submersion permanente de certaines zones côtières aujourd'hui émergées (Bastone et De la Torre, 2011).

La probable augmentation des houles cycloniques mais aussi de la surcote atmosphérique (rôle de la pression barométrique et des vents de mer) accentuera les risques de submersions extrêmes.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il est vrai que les effets potentiels du changement climatique sur les versants naturels sont difficiles à évaluer précisément car ils impliquent des processus multiples. Cependant, comme l'a montré ce rapport, il est possible de dégager des tendances qui devront être affinées dans des études futures.

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 l'angle de frottement drainé de la surface potentielle de glissement, le poids volumique et la cohésion du sol selon les processus décrits dans ce rapport. La stabilité d'un versant, caractérisée notamment par le facteur de sécurité, va globalement diminuer avec l'augmentation des précipitations et des températures même si la multitude des mécanismes mis en jeu 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. La perte de la végétation dans les zones où les feux de forêts se multiplieront sera aussi un facteur de déstabilisation des couches superficielles.

Concernant l'aléa glissement profond, les avis sont plus divisés. Certains sont en faveur d'une augmentation en intensité et en fréquence en parallèle avec l'augmentation des précipitations intenses. D'autres pensent que l'effet sera limité voire inexistant. Toutefois, suite 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.

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. De plus, même si les scénarios se veulent généralisables, les incertitudes de prévision sont d'autant plus importantes que les hypothèses de modélisation ne se basent pas sur un site réel. En effet, les facteurs de site font varier de manière non négligeable les prédictions. Pour palier à cette limite intrinsèque de la modélisation, il est possible de développer deux autres outils qui ensuite pourront être des données d'entrée de la modélisation : les observations et les mesures de terrain. En effet, à travers les

ouvrages bibliographiques investigués, il semble que le manque de telles données (en plus des incertitudes et des variations de données obtenues par modélisation) soit un facteur bloquant à la vérification des hypothèses faites sur l'impact du changement climatique.

Dans cet objectif, il serait utile de mener les investigations suivantes sur plusieurs sites présentant des versants instables et localisés dans des contextes climatiques différents :

- recherche des chroniques de température et de précipitation disponibles ;
- installation d'une station météorologique pour récupérer les données climatiques (température, ensoleillement, précipitation, vent, pression) ;
- relevé des données de site (végétation, topographie, etc.) ;
- instrumentation du versant instable (mesure des déplacements en sol meuble, fissuromètre en falaise rocheuse, etc.).
- collectes et analyse des données à différentes échelles : locale, régionale, nationale et mondiale.

La comparaison de l'évolution de la stabilité de ces versants en fonction des paramètres climatiques pourraient donner une indication fiable de l'impact du changement climatique sur les versants instables.

Ainsi, même s'il semble fortement prévisible que ce genre d'aléas liés aux versants instables vont augmenter avec le changement climatique et les changements sociétaux, les outils de prévision pourront être améliorés dans l'avenir dans le but de prévenir et d'agir contre l'impact du changement climatique sur les versants instables.

8. BIBLIOGRAPHIE

Bärring, L. & Persson, G. 2006. Influence of climate change on natural hazards in Europe. Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of European regions. 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.

Bidalot Y., 2006. Impacts du changement climatique sur les milieux montagnards. Mémoire – Examen final - Accompagnateur en moyenne montagne | 2006.

Bo, NW., Fabius M., Fabius K., 2008. Impact of global warming on stability of natural slopes. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management. Presse de l'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.

Dixon N., Dijkstra T., Forster A., Connell R., 2006. Climate change impact forecasting for slopes (CLIFFS) in the built environment. IAEG2006 Paper number 528.

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: case study of the Rochers de Valabres slope (France). International Journal of 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, édité par John J. Clague and Douglas Stead.

Huggel C., Clague JJ., Korup O., 2011. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? Earth Surface Processes and Landforms 37, 77–91 (2012). Copyright © 2011 John Wiley & Sons, Ltd. Published online 28 September 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/esp.2223

Institut des Risques Majeurs, 2005. Risques Infos...Les mouvements de terrain. Bulletin de liaison n°16, ISSN 0999-5633, juin 2005.

Malet JP., Remaître A., Maquaire O., Durand Y., Etchevers P., Guyomarch G., Déqué M., van Beek L.P.H., 2007. Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley. ACI-FNS Programme 'Aléas et Changements Globaux': Project GACH2C 'Glissements Alpins à Contrôle Hydrologique et Changement Climatique' (2005-2007)

MIES (2000). "Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle." Rapport de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre: 127 p.

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.

Sass O., Oberlechner M., 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

UK office, 2010 ???. Climate: Observations, projections and impacts. Produced by the Met Office. © Crown copyright 2011 11/0209g Met Office and the Met Office logo are registered trademarks