



Changement climatique  
et risques naturels

dans les montagnes tempérées





**Rédaction :** Silvère RIEUX--ZANNINI, Johan MILIAN, Hélène DENIS et Pauline TEILLAC-DESCHAMPS, sous la direction de Sébastien MONCORPS, Directeur du Comité français de l'UICN.

#### Remerciements

Le Comité français de l'UICN remercie particulièrement :

- les personnes ayant contribué à cette étude et plus particulièrement : Jean-Guillaume THIEBAULT, Ludovic RAVANEL, Marie-Antoinette MELIERES et Jean-Christophe POUPET ;
- les membres du groupe de travail « Montagne » du Comité français de l'UICN, présidé par Hélène DENIS ;
- les partenaires financiers de cette étude : le Parc national des Pyrénées et l'Université Paris VIII.



**Citation de l'ouvrage :** UICN France (2015). Changement climatique et risques naturels dans les montagnes tempérées. Paris, France.

**Dépôt légal :** Mars 2016

**ISBN :** 978291810553

*La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite à condition que la source soit dûment citée. La reproduction à des fins commerciales, et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable du Comité français de l'UICN.*

**Crédit photographique :** Paul Estève (couverture), Magali Rossi (quatrième de couverture).



**Comité français de l'UICN**

Musée de l'Homme

17, place du Trocadéro - 4<sup>e</sup> étage Pavillon d'About - 75016 Paris - France

Tél. : 01 47 07 78 58 - Fax. : 01 47 07 71 78

uicn@uicn.fr [www.uicn.fr](http://www.uicn.fr)

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>Les écosystèmes montagnards sont très sensibles au changement climatique</b>	<b>6</b>
<b>Des modifications qui s'inscrivent dans la durée</b>	<b>8</b>
Le recul des glaciers	8
La dégradation du permafrost	9
La diminution de l'enneigement	10
<b>Quelles sont les causes de cette évolution ?</b>	<b>11</b>
L'élévation de la température	11
La modification du régime des précipitations	13
<b>Le changement climatique influence-t-il les risques naturels ?</b>	<b>14</b>
<b>Nature et évolution des risques</b>	<b>16</b>
De quels risques parle-t-on ?	16
Peut-on repérer une tendance claire dans l'évolution des risques ?	17
<b>Évolution des risques : une causalité qui fait débat</b>	<b>20</b>
Certains effets se combinent et interagissent	20
Des incertitudes à prendre en compte	23
<b>L'avantage des « solutions fondées sur la nature » pour gérer les risques</b>	<b>26</b>
<b>Les limites de la gestion présente</b>	<b>28</b>
La gestion des risques naturels : une histoire ancienne	28
Protection active, protection passive et prévention	29
Adaptation	29
<b>Les expériences de solutions fondées sur la nature</b>	<b>30</b>
Le concept de solutions fondées sur la nature	30
Les forêts de protection, des sentinelles contre les phénomènes érosifs et les avalanches	30
La lutte contre les phénomènes érosifs par la re-végétalisation	32
Avantages des milieux humides pour atténuer les crues et inondations	33
<b>Conclusion</b>	<b>34</b>

## Introduction



© Lucie Dufay

Les activités humaines liées au développement des industries, des transports, de l'urbanisation et les émissions de gaz à effet de serre associées modifient le climat à la surface de la Terre. La hausse moyenne des températures, le recul des glaciers, les modifications des régimes pluviométriques sont autant de signes et de conséquences de ce changement climatique planétaire. Il impacte également les milieux naturels en perturbant les saisons de végétation, en modifiant les aires de répartition des espèces et des habitats naturels, en aggravant la désertification...

Ces effets s'ajoutent et amplifient les autres menaces qui pèsent sur la biodiversité.

La modification des paramètres bioclimatiques entraîne mécaniquement des répercussions sur les risques naturels, plus particulièrement sur la fréquence et la magnitude des aléas. Ces phénomènes, dont la dangerosité

est aggravée parallèlement par l'accroissement de la présence humaine, peuvent se révéler de plus en plus destructeurs comme l'ont été des épisodes récents d'inondations, de sécheresses, de tempêtes (Lothar et Martin en 1999, Klaus en 2009 et Xynthia en 2010), et de canicules.

Les montagnes sont particulièrement concernées par ces évolutions : elles apparaissent comme les sentinelles des effets du changement climatique auquel elles sont très exposées. Ainsi au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, l'élévation de température enregistrée dans les Alpes a été deux fois plus importante que la moyenne nationale (EAA, 2009).

Afin de se mobiliser face aux enjeux du changement climatique, il est indispensable d'engager une réduction drastique de nos émissions des gaz à effet de serre.



En application des engagements pris dans l'accord de Paris à l'issue de la COP21, cette réduction doit permettre de limiter le réchauffement moyen de la surface de la planète en dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, à l'horizon 2100 (seuil proposé par les analyses du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; GIEC).

En complément des mesures pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, il est indispensable de s'engager dans des stratégies d'adaptation des territoires aux conséquences du changement climatique. Si la vulnérabilité des écosystèmes face au changement climatique est aujourd'hui documentée et reconnue, les opportunités basées sur leur conservation, leur gestion durable et leur restauration pour y faire face sont souvent sous estimées et méconnues. Pourtant, elles représentent un potentiel considérable pour le stockage et le

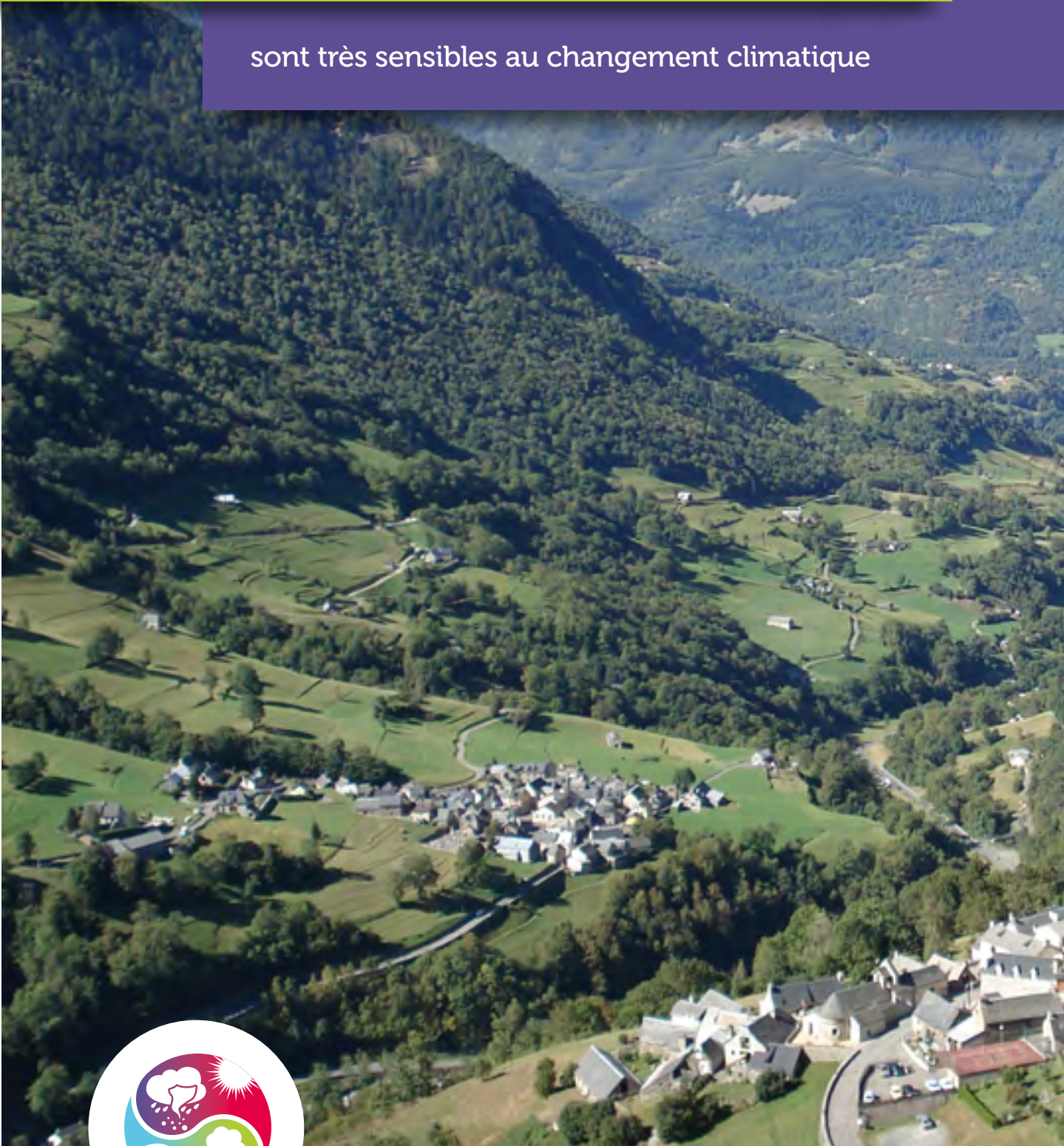
captage du carbone ainsi que de réelles opportunités pour réduire les risques naturels exacerbés par le changement climatique. De plus, ces solutions apportent des avantages combinés sur les plans environnementaux, économiques et sociaux.

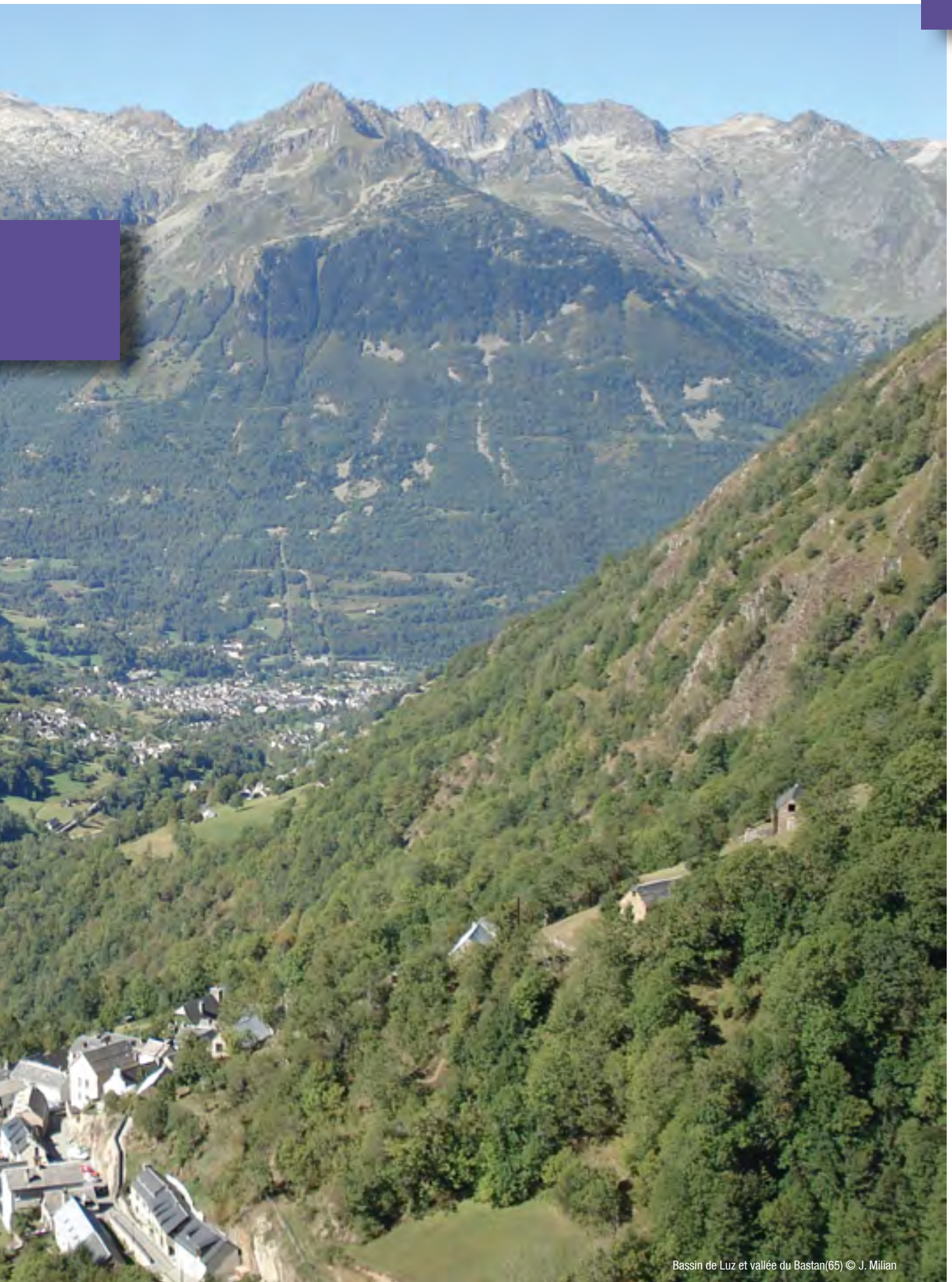
Le Comité français de l'UICN propose d'investir dans des « solutions fondées sur la nature », c'est-à-dire fondées sur l'utilisation des capacités de résilience des écosystèmes. Ces solutions permettent aussi de répondre au défi de l'érosion de la biodiversité et de la dégradation des écosystèmes.

Ce document présente les principaux enjeux liés aux risques naturels en montagne sous l'effet du changement climatique et les solutions de gestion de ces risques utilisant les capacités des écosystèmes tout en contribuant à la conservation de la biodiversité.

## Les écosystèmes montagnards

sont très sensibles au changement climatique





## Des modifications qui s'inscrivent dans la durée

Les montagnes sont le théâtre de transformations rapides, perceptibles de façon plus ou moins directe dans le paysage, telles que le recul des glaciers, la dégradation du permafrost, la diminution de l'enneigement ou encore la remontée en altitude des espèces. Ces modifications ont fait l'objet d'observations scientifiques à moyen et long terme.



Vallée de Gavarnie et Hount Grane © J. Milian

### ■ Le recul des glaciers ■

Le recul des glaciers constitue l'un des changements les plus manifestes dans les montagnes tempérées. Il s'agit en outre du phénomène le plus étudié et le mieux documenté en haute montagne au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. En effet, sur cette période, presque tous les glaciers de montagne du monde ont été marqués par un recul, avec une perte à la fois en superficie et en volume. Ce processus s'est par ailleurs accéléré depuis deux décennies. Il faut toutefois noter que le retrait a été ponctué de courtes périodes d'avancée, principalement enregistrée dans les années 1960 et 1980 [Claque et *al.*, 2012].

Si la réponse des glaciers aux variations climatiques est immédiatement perceptible au niveau de leur volume, la réponse au niveau du recul du front n'est toutefois pas instantanée ; il existe ainsi un délai d'ajustement, pouvant atteindre plusieurs décennies, d'autant plus long que la taille du glacier est importante.

Si l'on s'intéresse plus particulièrement au cas des montagnes tempérées, en Europe par exemple, les évolutions

avérées de ce retrait sont significatives mais avec des intensités différentes.

Entre 1850 et 2007, la superficie des glaciers pyrénéens s'est ainsi réduite de 85 %, contre 50 % pour les glaciers alpins sur la même période [Gardent, 2014]. Et dans les Alpes, on constate que depuis 1980 le recul s'accroît. Les épisodes extrêmes ont en outre un impact très fort. La canicule de 2003 par exemple a entraîné une perte de masse glaciaire dans les Alpes trois fois plus élevée que le rythme moyen de recul sur la période 1980-2000 [Keiler et *al.*, 2010].

Le suivi de nombreux glaciers est indispensable pour obtenir des observations précises et une meilleure connaissance de ce phénomène. Le Parc National des Écrins, en partenariat avec le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de Grenoble (LGGE), réalise des opérations de suivi des glaciers en mesurant le recul des fronts et calculant l'évolution de la masse glaciaire. À titre d'exemple, le Glacier blanc a reculé de 726 mètres entre 1986 et 2012 [Parc National des Écrins (a)] et a perdu 8,10 mètres d'épaisseur en moyenne entre 2000 et 2013 [Parc National des Écrins (b)].



1995



2001



2009



Recul du front du Glacier blanc, de haut en bas : 1995, 2001, 2009 (Photos : © Joël Faure, © Dova Emmanuelle – Parc national des Ecrins)

La superficie des glaciers au début du XXI<sup>ème</sup> siècle a été estimée à 275 km<sup>2</sup> pour les Alpes françaises [GlaRiskAlp] et seulement à 3,5 km<sup>2</sup> pour les Pyrénées [Moraine, l'Association Pyrénéenne de Glaciologie, 2010]. Le retrait des glaciers devrait se poursuivre et s'accélérer, et pourrait conduire à une disparition des plus petits glaciers des Alpes d'ici 2050 [Bogataj, 2007] et de l'ensemble des glaciers pyrénéens à l'horizon 2070 [OPCC, 2013]. Toutefois, les glaciers dont la zone d'accumulation se situe haut en altitude, au-dessus de 2500 m environ, devraient être moins affectés même si on constate aujourd'hui que les lignes d'équilibre glaciaire<sup>1</sup> sont situées au-dessus de 3000 m [Richard et *al.*, 2010].

### ■ La dégradation ■ du permafrost

Une transformation plus « silencieuse », dont l'effet n'est pas directement visible dans le paysage, se produit également en haute montagne : il s'agit de la dégradation du permafrost. Mais si le permafrost est invisible, les manifestations de sa dégradation (laves torrentielles, écroulements, glissements...) ne le sont pas.



Le permafrost (ou pergélisol) défini comme « *un matériau de la lithosphère (sol ou rocher) qui reste à 0°C ou moins pendant plus de deux ans* » [NRCC 1988] est très sensible au réchauffement climatique. Depuis la fin du Petit Age Glaciaire (vers 1860 en Europe), le permafrost se réchauffe graduellement. Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, le permafrost alpin a gagné 0,5 à 0,8°C dans les premières dizaines de mètres de profondeur du sol [Keiler et *al.*, 2010] et le taux annuel de fonte de la glace qu'il contient semble avoir plus que doublé depuis les années 1970 [Prudent-Richard et *al.*, 2008]. Ce réchauffement s'accompagne d'une augmentation de l'épaisseur de la couche active du permafrost, c'est-à-dire la couche superficielle qui dégèle saisonnièrement et regèle durant la saison froide.

1 | Il s'agit de la limite entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation.

L'évolution du permafrost est particulièrement sensible aux fortes températures estivales. Ainsi au cours de la canicule de 2003 « la profondeur de dégel du permafrost [...] a excédé de 10 à 50 cm les moyennes des 20 années précédentes. » [Prudent-Richard et al., 2008]. Cette dégradation a pour conséquence une augmentation de la pression de l'eau dans le sol et les parois rocheuses ainsi qu'une perte de cohésion au sein de leurs matériaux. Elle influence donc l'évolution des aléas naturels tels que les écroulements, éboulements, chutes de pierres, glissements de terrains et laves torrentielles.

### ■ La diminution ■ de l'enneigement

Les observations scientifiques ont également permis de révéler une tendance générale à la baisse de la durée et de la hauteur du manteau neigeux ces dernières décennies (OPCC, 2013). Cette diminution de la durée d'enneigement varie suivant l'altitude : plus marquée à basse et moyenne altitude et la durée de l'enneigement peut augmenter à plus haute altitude [Prudent-Richard et al., 2008]. Cependant, il faut souligner la difficulté d'établir des tendances sur les dernières décennies, en particulier en haute altitude (au-dessus de 2 200 m), en l'absence de séries de données de qualité sur une période suffisamment longue [Météo France (a)].

L'évolution du manteau neigeux se caractérise par une grande variabilité interannuelle. A ce titre, les Pyrénées ont connu des chutes de neige abondantes au cours des derniers hivers (2013, 2014 et 2015), l'enneigement exceptionnel de l'hiver 2013 ayant atteint un niveau jamais vu depuis 40 ans sur la partie ouest du massif selon Météo France [Météo France (b)]. Le Centre National de Recherches Météorologiques<sup>2</sup> a mené une étude prospective afin d'évaluer si cette succession d'hivers fortement enneigés correspondait à une tendance ou s'il s'agissait d'une série d'événements exceptionnels. Cette étude a conclu à une forte baisse de la durée d'enneigement de tous les massifs français jusqu'à 2 500 m d'altitude dès 2050 ainsi qu'à une accentuation de cette baisse à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle à toutes les altitudes, renforcée notamment en moyenne montagne [Déqué, 2012].

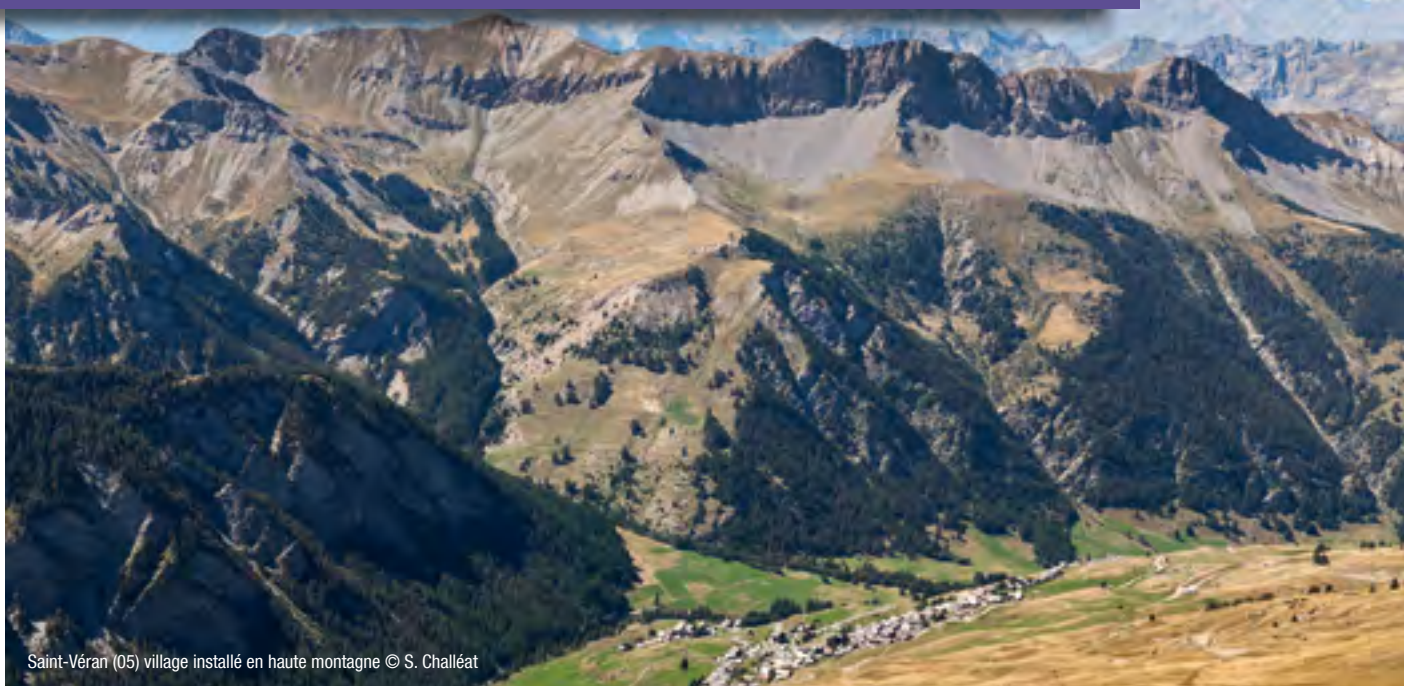
Les zones les plus touchées par cette baisse de la durée d'enneigement devraient être les Alpes du sud et la partie centrale des Pyrénées. D'après une étude réalisée par Météo France, une élévation de la température de 1,8°C conduirait à une réduction de la durée annuelle d'enneigement d'environ un mois à basse altitude (autour de 1500 m) dans les Alpes et les Pyrénées. L'épaisseur moyenne du manteau neigeux passerait quant à elle, à basse altitude, de « 1 m à 60 cm dans les Alpes du nord et de 40 cm à 20 cm dans les Alpes du sud et les Pyrénées » [OPCC, 2013].



2 | « Service de recherche de Météo-France, le CNRM assure l'essentiel des activités de recherche, et coordonne l'ensemble des actions de recherche/développement conduites au sein de Météo-France » (<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?rubrique1&lang=fr>)

## Quelles sont les causes de cette évolution ?

Les tendances exposées précédemment sont reliées à l'évolution combinée des deux paramètres climatiques que sont la température et les précipitations.



Saint-Véran (05) village installé en haute montagne © S. Challéat

Aujourd'hui, le réchauffement climatique est un fait avéré : le cinquième rapport du GIEC paru en 2014 conclut à un réchauffement sans équivoque à l'échelle globale et désigne les zones de montagne comme particulièrement sensibles au réchauffement climatique.

L'augmentation de la température a une action directe sur l'évolution des glaciers, du permafrost et du manteau neigeux en provoquant notamment la fonte de la glace et de la neige. De plus, la température atmosphérique « *contrôle très largement les alternances gel/dégel, le ratio pluie/neige ou la position en altitude du couvert neigeux et de la ligne d'équilibre glaciaire (LEG)* » [Einhorn et al., 2015], autant de paramètres qui ont une influence sur la dynamique des glaciers, du permafrost et du manteau neigeux.

La dynamique des glaciers et du permafrost est étroitement liée à l'évolution du régime des précipitations et particulièrement des précipitations neigeuses. Les chutes de neige alimentent les glaciers en hiver et le manteau neigeux joue un rôle important dans l'évolution du permafrost par son rôle d'isolant du sol.

### ■ L'élévation ■ de la température

Marquée par une accélération depuis les années 1980, l'augmentation de la température au cours du XX<sup>ème</sup> siècle en zone de montagne est bien supérieure à celle observée au niveau mondial. Elle est évaluée à environ 2°C dans les Alpes [Korck et al., 2011] et entre 0,9 et 1,1°C dans les Pyrénées [OPCC, 2013] contre 0,74°C à l'échelle du globe et 0,95°C en France métropolitaine [Prudent-Richard et al., 2008] sur la même période (voir Figure 1).

Pour les prochaines décennies, les scénarios fondés sur les projections des émissions de gaz à effet de serre établis par le GIEC, indiquent un renforcement du réchauffement climatique et une accélération des effets en cascade liés à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cependant, il faut bien avoir conscience que les impacts futurs de ce réchauffement s'ajouteront aux précédents et pourront donc en amplifier les conséquences [Mélières, 2014].

A partir de 2050, les scénarios du GIEC divergent. Les projections climatiques régionales issues des scénarios moyens d'émissions de gaz à effet de serre [EEA, 2009] prédisent une élévation des températures comprise entre 2,6 et 3,9°C pour la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle dans les Alpes et entre 2,8 et 4°C dans les Pyrénées<sup>3</sup> [OPCC, 2013].

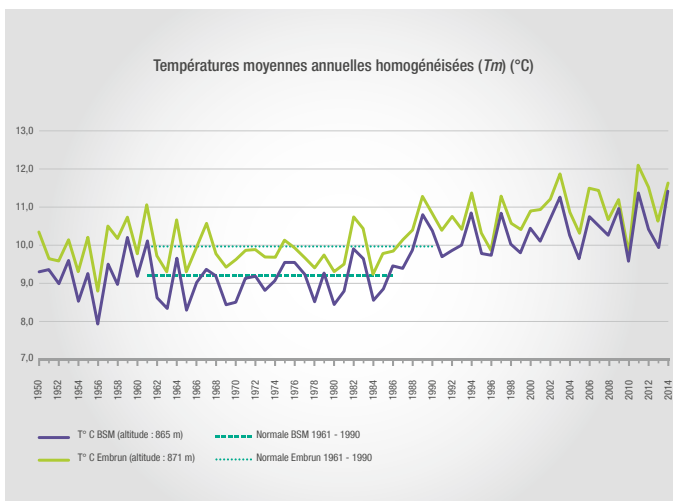


Figure 1 : Températures moyennes annuelles homogénéisées de 1950 à 2014 à Bourg-Saint-Maurice (BSM) et Embrun et normales sur la période de référence 1961-1990. Données : Météo-France ; Traitement : MDP-OsCC/PARN.

Les modèles climatiques font également apparaître des disparités internes à l'échelle des massifs alpin et pyrénéen suivant les localisations et les saisons. Dans les Alpes, les augmentations les plus importantes sont attendues dans la partie sud-ouest et seront éventuellement plus modestes dans la partie nord-est [EEA, 2009]. Pour les Pyrénées, le versant sud de la chaîne devrait être plus affecté [OPCC, 2013]. De plus, le réchauffement devrait être plus marqué en période estivale avec en moyenne +4.8°C dans l'arc alpin et jusqu'à +6°C dans certaines parties du massif.

Les données issues des suivis nivo-météorologiques réalisés par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) depuis 1961 au col de Porte (massif de la Chartreuse, 1 325 m) indiquent que la réduction de la couverture neigeuse serait liée au réchauffement et non pas à une diminution des précipitations, ces dernières étant restées stables en moyenne ces dernières décennies [Mélières, 2014]. Les prévisions de baisse de l'enneigement sont à mettre en relation avec la diminution attendue de la proportion des précipitations neigeuses par rapport aux précipitations liquides : une remontée de 650 m de la limite pluie/neige est probable d'ici la fin du siècle [EEA, 2009]. Une fonte nivale plus précoce est attendue, s'ajoutant à l'avancée déjà constatée de deux semaines au cours des dernières décennies en Europe [Mélières, 2014].

Cette élévation de la température, tant observée qu'à venir, influe donc fortement sur les milieux montagnards, très sensibles au changement climatique.



3 | Les écarts de températures sont présentés en comparaison avec la température moyenne de la période de référence 1961-1990.

## La modification du régime des précipitations

En ce qui concerne le régime des précipitations, les tendances d'évolution sont moins claires que pour la température (voir Figure 2). Les observations et les projections sont marquées par une variabilité temporelle et spatiale très élevée. Malgré les difficultés à prévoir les changements qui affecteront le régime des précipitations, la majorité des scénarios s'accordent sur une augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été dans de nombreuses régions des Alpes d'ici la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle [Korck et *al.*, 2011]. Les changements les plus significatifs interviendront pendant l'été au niveau de la partie sud-ouest du massif, plus affectée par la réduction des précipitations que la partie nord-est [EEA, 2009]. Que ce soit dans les Alpes ou les Pyrénées, une baisse du total annuel des précipitations est également attendue d'ici la fin du siècle [EEA, 2009 ; OPCC, 2013].

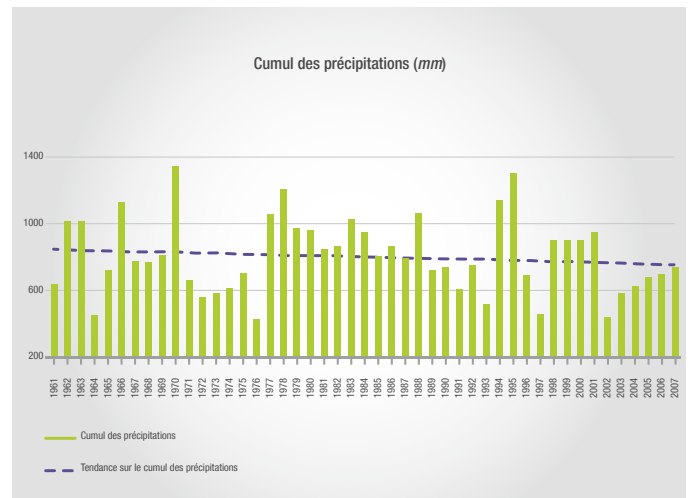


Figure 2 : Évolution du cumul des précipitations (entre le 1<sup>er</sup> décembre et 30 avril) au col de Porte de 1961 à 2007; données Météo France - Centre d'étude de la Neige.



© Lucie Dufay

De nombreux aléas naturels (écroulements, crues torrentielles...) se déclenchent généralement sous l'effet d'événements météorologiques extrêmes et seront donc susceptibles d'être modifiés sous l'influence du changement climatique. Les montagnes d'Europe sont d'autant plus sensibles à ces transformations qu'elles sont très anthropisées et très fréquentées. Les activités socio-économiques, notamment sylvicoles et agro-pastorales qui y sont développées, utilisent et façonnent depuis longtemps les écosystèmes montagnards et les ressources qu'ils fournissent.

Les crues torrentielles qui se sont produites en 2013 dans les Pyrénées et leurs conséquences en termes de perte de terres agricoles illustrent bien les pressions exercées par les phénomènes naturels sur les activités socio-économiques, pressions qui, dans le cas cité, s'ajoutent à celles induites par l'urbanisation issue de l'étalement urbain.

## Le changement climatique

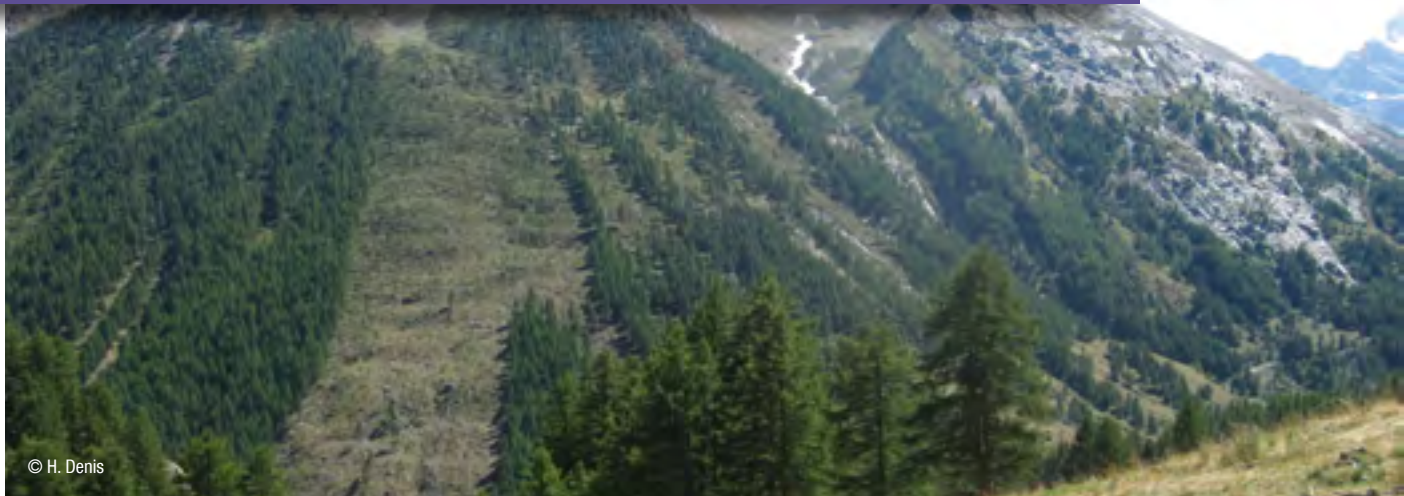
influence-t-il les risques naturels ?





## Nature et évolution des risques

Du fait de la combinaison de facteurs climatiques et topographiques singuliers, les montagnes sont des milieux très dynamiques et propices à divers aléas naturels.



© H. Denis

### ■ De quels risques ■ parle-t-on ?

Un aléa naturel est la possibilité qu'un phénomène, qu'une manifestation naturelle physique (non biologique) relativement brutale, menace ou affecte une zone donnée. La notion de risque climatique désigne un phénomène qui « se déclenche le plus souvent à la suite d'épisodes climatiques [...] lorsque la nature du terrain s'y prête » [Chauvin, Maugard, 2013]. Ces aléas naturels, souvent liés à ces contextes climatiques ou météorologiques particuliers rencontrés en montagne, revêtent des formes très différentes : avalanches, crues des rivières, crues et laves torrentielles, glissements de terrains, chutes de blocs, éboulements et écroulements, phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire, incendies de forêts.

On distingue 4 types principaux d'aléas naturels :

Les **crues torrentielles** ont la particularité, par rapport aux crues des cours d'eau à pente modérée ou faible, de transporter des sédiments en quantité beaucoup plus importante. Dans le cas des **laves torrentielles**, les quantités de sédiments mobilisés sont considérables et peuvent constituer la majeure partie de l'écoulement. La dynamique des écoulements torrentiels est donc conditionnée à la fois par la composante liquide et par la composante sédimentaire.

Concernant les **glissements de terrain**, deux types sont distingués en fonction de la profondeur de la surface de glissement (surface séparant la partie stable du sol de la partie en mouvement) : (i) les glissements dits superficiels pour lesquels la profondeur de cette surface varie de quelques décimètres à plusieurs mètres et (ii) les glissements profonds lorsqu'elle est de plusieurs dizaines de mètres [Chauvin, Maugard, 2013].

Les **aléas d'origine glaciaire** peuvent résulter de l'écoulement d'eau sous forme liquide (vidanges brutales de lacs glaciaires ou de poches d'eau glaciaires) ou de mouvements gravitaires d'eau sous forme solide : chute de séracs, rupture de glaciers [Richard et al., 2010].

Les **phénomènes d'origine périglaciaire** sont les « *phénomènes consécutifs à la fonte du pergélisol [...] mais aussi les instabilités des secteurs récemment désenglacés suite au retrait glaciaire* » [PARN, 2012] (déstabilisation de glaciers rocheux, écroulements rocheux, laves torrentielles).

Les **risques naturels** résultent de la conjonction entre un aléa naturel et des enjeux variés. Les enjeux se rapportent à des populations exposées (habitants, usagers) ainsi qu'à des éléments matériels (bâtiments, infrastructures ou encore activités économiques). La notion de risque n'a donc de sens que dans la mesure où des enjeux sont menacés par la manifestation d'aléas naturels.



Certains risques résultant des phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire sont qualifiés d'émergents dans un rapport du Pôle Alpin d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PARN) de 2013 pour la raison qu'ils n'ont « *pas ou peu d'équivalent dans le passé, entre autres du fait d'une évolution climatique hors de la variabilité connue* » [Boudières, Peissier, 2013a].

Les zones de montagne sont caractérisées par des conditions climatiques spécifiques qui influent sur la nature des risques. Du fait des effets de l'altitude et des différences d'exposition des versants, la température et le régime des précipitations y connaissent une importante variabilité spatiale.

La température baisse en moyenne d'environ 0,55°C pour 100 mètres d'élévation mais cette valeur est variable suivant les saisons, l'exposition ou le degré de continentalité [Station alpine Joseph Fourier]. De plus, les variations thermiques journalières sont élevées et donnent lieu à un mécanisme auquel sont liés de nombreux processus physiques et biologiques : l'alternance gel/dégel. Cette alternance est par exemple impliquée dans la destruction des matériaux rocheux : l'eau sous forme solide occupant un plus grand volume que sous forme liquide, le passage de l'eau située dans les interstices de la roche d'un état à l'autre provoque un agrandissement des fissures dans des conditions particulières, processus appelé gélifraction ou cryoclastie [Société Suisse de Géomorphologie]. L'alternance gel/dégel est ainsi impliquée dans l'activité de divers phénomènes naturels : chutes de blocs et écoulements torrentiels puisqu'elle permet en aval un approvisionnement en sédiments des systèmes torrentiels...

Par ailleurs, les massifs montagneux jouent le rôle d'écrans condensateurs des masses d'air humide et sont ainsi souvent le siège de précipitations abondantes mais avec d'importantes variations spatiales, du fait du relief. Certaines vallées internes alpines peuvent de ce fait être marquées par des conditions relativement sèches. Le Valais (Suisse) présente par endroits « *des précipitations annuelles atteignant à peine 600 mm en plaine et moins de 800 mm à 1 600 m d'altitude.* » [Angeliaume, 2011].

Les milieux de montagne sont aussi caractérisés par une topographie variée résultant de la succession et de la combinaison de processus tectoniques et de processus d'érosion.

La particularité des montagnes tempérées repose sur le postulat d'une tectonique relativement récente se traduisant par la présence de pentes fortes façonnées par les processus d'érosion, entre autres par les processus torrentiels et glaciaires. Des massifs pour lesquels l'érosion agit depuis plus longtemps, tels que les massifs anciens nord-américains et eurasiens ou encore les boucliers latino-américains et africains, présentent des dénivelées beaucoup plus faibles en comparaison [Antoine, Milian, 2011].

La pente en montagne donne lieu à des phénomènes gravitaires définis par une interdépendance entre l'amont et l'aval.

Cette fonction de transfert amont-aval a des conséquences sur les milieux naturels ainsi que sur les sociétés humaines. Elle permet par exemple l'approvisionnement en eau des fonds de vallée et des plaines limitrophes mais elle est également initiatrice d'aléas naturels qui génèrent des risques pour les populations et les infrastructures. Certains aléas naturels sont propres au milieu montagnard comme les avalanches, les chutes de blocs ou encore les chutes de séracs. Si la dynamique dans le sens amont-aval est la plus fréquente, l'inverse existe également. Des aléas se déroulant dans la partie aval d'un versant peuvent avoir des répercussions dans sa partie amont : par exemple, le sapement de la base d'un versant par un cours d'eau situé en fond de vallée peut générer une déstabilisation des terrains par un processus dans le sens aval-amont (érosion régressive). L'interdépendance amont-aval est donc une importante dimension à intégrer dans l'analyse des risques naturels en montagne.

## ■ Peut-on repérer ■ une tendance claire dans l'évolution des risques ?

Sous l'effet du changement climatique, des modifications plus ou moins claires des aléas naturels sont identifiées.

### ■ Avalanches

Depuis 1980, une diminution de l'activité avalancheuse globale a été notée, tant en termes de nombre d'avalanches que de distances parcourues. Cette tendance est à mettre en relation avec le réchauffement marqué [Eckert, 2011] entraînant un plus grand nombre d'avalanches de neige humide et un moins grand nombre d'avalanches de neige sèche [Prudent-Richard et al., 2008]. Ce changement dans la proportion entre avalanches de neige humide et avalanches de neige sèche figure, avec la diminution de l'activité avalancheuse aux basses et moyennes altitudes, parmi les hypothèses les plus probables de l'évolution de l'activité avalancheuse en réponse aux chan-



© J. Milian

gements climatiques. Il est également admis que la stabilité du manteau neigeux devrait augmenter avec le réchauffement [Berger et al., 2013]. Il s'agit bien entendu de tendances moyennes et il n'est pas exclu que, lors d'épisodes froids associés à de fortes précipitations neigeuses, des avalanches de neige sèche puissent continuer à se déclencher, y compris à basse altitude, ou encore que des avalanches d'intensité supérieure à celle recensée jusqu'à présent ne se produisent.

Plusieurs évènements récents peuvent d'ailleurs être cités pour l'illustrer : les crues avalancheuses de décembre 2008 dans les Alpes du Sud et en Haute Maurienne [Einhorn et Peissier, 2011], les avalanches nombreuses des hivers 2012-2013, 2013-2014 et 2014-2015 dans les Pyrénées [Jean-Yves Lasplaces, interview].

### ■ Crues des rivières

Aucune tendance significative concernant la fréquence et l'intensité des crues n'a été établie à l'échelle des Alpes bien que la fréquence des crues extrêmes semble avoir augmenté au cours des vingt dernières années par rapport à la moyenne du XX<sup>ème</sup> siècle. En revanche, lorsque les analyses se focalisent sur les cours d'eau à régime nival et glaciaire, on peut identifier une évolution de leurs régimes. En raison de la fonte accrue des glaciers, les cours d'eau à régime glaciaire connaissent une augmentation de leurs débits estivaux. A long terme, cette tendance devrait s'inverser du fait de la réduction importante du volume des glaciers réservoirs. Les cours d'eau à régime nival montrent également des variations du régime des crues et des étiages en fonction de la date de fonte du manteau neigeux et de l'importance de celui-ci [Prudent-Richard et al., 2008]. Les tendances qui affectent les rivières de montagne dans les Alpes comme dans les Pyrénées dépendent donc de leur régime hydrologique.



© Aline Louyat

Les récentes inondations de type cévenol survenues à l'automne 2015 dans les Alpes maritimes témoignent de l'augmentation des destructions liées aux crues exceptionnelles

des cours d'eau. Cette augmentation a principalement deux types d'origine : (i) l'artificialisation du territoire et (ii) les épisodes pluvieux par eux-mêmes qui semblent plus fréquents et plus violents. Cette dernière caractéristique semble liée au réchauffement des eaux de surface de la mer Méditerranée.

Un épisode cévenol, phénomène climatique caractérisé par de très fortes pluies sur une période concentrée, a provoqué des inondations dans le Gard et l'Hérault au début de l'automne 2015. Ces phénomènes se déroulent à la fin de l'été et en automne. Ils se caractérisent par l'accumulation de masses nuageuses en provenance du golfe du Lion, souvent dans un régime de vents de sud à sud-est très humides, provoquant dans un premier temps des pluies orographiques sur les massifs qui finissent par s'étaler en général jusqu'en plaine. Un épisode cévenol se déroule normalement sur plusieurs jours et donne en moyenne des quantités d'eau comprises entre 200 et 400 mm sans que cela revête un caractère exceptionnel pour ces régions montagneuses (plus rarement jusqu'à 600 ou 700 mm au cours d'épisodes vraiment intenses). Ce réchauffement entraîne une évaporation accrue et des masses d'air plus chargées en humidité qui alimentent les épisodes cévenols. Il s'agit, ici d'un exemple de l'accroissement de crues liées au changement climatique en cours.

### ■ Crues et laves torrentielles

Plusieurs tendances dans l'activité des laves torrentielles sont identifiées à des échelles locales sans permettre de généralisation. Les observations réalisées dans le massif des Écrins et celui du Mont Rose tendent à confirmer une remontée des zones de départ. Dans le même temps, d'après les suivis opérés dans certains massifs depuis les années 1970, il semble y avoir eu une diminution de la fréquence de ces événements dans les Ecrins et le Dévoluy, par exemple [Prudent-Richard et al., 2008]. Le printemps et l'été 2015 dans les Alpes ont été exceptionnels, aussi bien du point de vue météorologique que du point de vue de l'activité des aléas naturels. De très nombreux événements ont été observés : au mois d'août, en haute Maurienne, deux laves torrentielles se sont formées successivement dans le torrent de l'Arcelle à la suite de deux importants glissements de terrain (dans des terrains à permafrost) au niveau du front d'un glacier rocheux situé vers 2 800 m d'altitude. Ces laves, d'un volume cumulé de 15 000 m<sup>3</sup>, ont obstrué le chenal au niveau d'un passage busé, provoquant le débordement du torrent dans le village de Lanslevillard et causant d'importants dégâts matériels à la station de Val Cenis, chiffrés à plusieurs centaines de milliers d'euros (Pauhle, 2015).



Dans les zones périglaciaires, il n'y a pas de preuve évidente d'une augmentation de ces événements au cours des dernières décennies [Huggel et al., 2013]. Pourtant selon les spécialistes, l'activité torrentielle devrait connaître « *une augmentation significative de la probabilité d'occurrence des laves torrentielles au nord comme au sud des Alpes, attendue pour 2050 et 2100* » [Einhorn et al., 2015].

### ■ Glissements de terrains

Les observations des effets du changement climatique sur les glissements de terrains sont peu nombreuses. Les glissements de terrains profonds ne montrent aucune tendance significative. Une augmentation du nombre de glissements de terrains superficiels corrélée à une augmentation des précipitations a été établie ces deux dernières décennies en Suisse (Romandie et canton du Tessin) [Prudent-Richard et al., 2008]. La combinaison de plusieurs facteurs est susceptible de modifier la fréquence et l'intensité des glissements de terrains superficiels dans les prochaines décennies.

### ■ Des écoulements rocheux plus fréquents

Des études menées dans le massif du Mont-Blanc montrent une corrélation entre l'occurrence des écoulements rocheux et les périodes les plus chaudes des 150 dernières années



(fin des années 1940/début des années 1950 et les deux dernières décennies). Sur les 42 écoulements recensés entre 1947 et la fin des années 2000 dans le versant nord des Aiguilles de Chamonix, 70 % ont eu lieu au cours des deux dernières décennies. De même, les étés particulièrement chauds désignés dans l'étude précitée (1947, 1976, 1983, 2003, 2009) sont caractérisés par une fréquence très élevée de ces événements [Ravel, 2010]. Le nombre d'écoulements de l'été 2003 sur l'ensemble du massif du Mont Blanc est estimé au double de celui de l'année 2009 qui a été une année très active et l'année 2015 a confirmé cette tendance.

### ■ Les feux de forêt gagnent du terrain : les Alpes du Nord dorénavant concernées



Le rapport 2010 de la mission interministérielle intitulée « Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêt » indique que les surfaces sensibles à l'aléa feux de forêt, représentent « *actuellement environ 1/3 des surfaces forestières métropolitaines* », et « *pourraient augmenter de 30 % à l'échéance 2040* » [Chatry et al., 2010]. Cet effet du changement climatique a déjà été observé durant la canicule de 2003. Au cours de l'été 2003, des feux de forêt sont survenus dans des massifs montagneux qui n'étaient habituellement pas affectés. C'est le cas par exemple du massif de la Chartreuse : les incendies déclenchés par la foudre le 27 juillet 2003 sur le sommet du Néron ont duré 33 jours et ont parcouru plus de 380 hectares de végétation [Institut des Risques Majeurs (b)]. De telles situations de risques de feux de forêt pourraient devenir plus communes d'ici la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle.

## Évolution des risques : une causalité qui fait débat

L'évolution des risques naturels en montagne est non seulement liée à la modification des aléas sous l'influence du changement climatique, mais aussi aux effets anthropiques marqués dans ces milieux.



© J. Milian

Les changements d'occupation des sols modifient la dynamique des aléas naturels. Par exemple, l'urbanisation influence le cycle naturel de l'eau du fait de l'imperméabilisation des sols en modifiant les temps d'écoulement, les volumes ruisselés ainsi que les quantités de sédiments transportés et influence donc l'activité des crues. D'autre part, la multiplication des aménagements en montagne engendre un accroissement des situations à risques. Dans ce contexte, la perception peut être faussée par la hausse de l'intérêt porté aux aléas naturels dont le recensement augmente sans que leur fréquence n'en soit forcément plus élevée [Robert Marie, Sébastien Chauvin, interview]. De plus certaines bases de données, à partir desquelles est étudié le lien entre changement climatique et modifications de l'activité des aléas naturels, recensent seulement les événements qui ont pu être observés et généralement ceux qui ont touché des enjeux humains. Elles sont donc influencées par l'évolution de la vulnérabilité des populations humaines [Jean-Yves Lasplaces, interview].

Les activités anthropiques et leurs effets sont particulièrement impliqués dans la dynamique des incendies de forêts. En effet, dans la majorité des cas, leur déclenchement est d'origine humaine et la superficie moyenne d'un feu, qui a

diminué ces dernières décennies, est surtout dépendante de l'amélioration des moyens de lutte contre les incendies [Météo France (c)], ce qui relativise l'effet du changement climatique.

Face à l'importance de l'influence anthropique, il semble donc difficile d'isoler les modifications des aléas naturels uniquement induits par le changement climatique. De plus, il est difficile de raisonner toutes choses égales par ailleurs et de discerner les conséquences propres de ce changement, car divers effets peuvent se cumuler ou se contrarier.

### ■ Certains effets se combinent et interagissent ■

L'activité des aléas naturels résulte des interactions entre hausse des températures et évolution des précipitations auxquelles se superposent les effets anthropiques cités précédemment.

L'augmentation des volumes de sédiments mobilisables résultant de la dégradation du permafrost pourrait modifier l'activité des crues et laves torrentielles ainsi que celle des

glissements de terrains superficiels. Le retrait glaciaire est également susceptible de fournir des sédiments suivant la nature de la roche sur laquelle les glaciers reposent [Einhorn, Peissier, 2011] : avec une charge plus solide, les crues torrentielles deviendraient plus destructrices. Outre la disponibilité de quantités de sédiments plus importantes, d'autres facteurs pourraient jouer un rôle plus impactant à l'avenir, notamment les variations saisonnières des précipitations neigeuses et l'augmentation probable de l'intensité des pluies extrêmes [Clague et al., 2012].

De plus, le couvert végétal jouant un rôle de protection contre l'érosion, les changements qui l'affectent devraient donc avoir une incidence sur l'activité de ces phénomènes. Ainsi, les feux de forêt constituent un facteur aggravant pour le déclenchement des glissements de terrains superficiels [Prudent-Richard et al., 2008] d'autant plus que l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et des sécheresses laisse craindre une accentuation des incendies de forêt. Ils peuvent également accentuer la fréquence des éboulements du fait des contraintes thermiques exercées sur la roche et diminuer le rôle de protection de la forêt dans le ralentissement des blocs (distance d'arrêt plus longue) [Frédéric Berger, interview].

La dégradation du permafrost est également impliquée dans le déclenchement des écroulements rocheux en haute montagne. De nombreuses observations effectuées notamment dans la face nord des Aiguilles de Chamonix et la face ouest des Drus en témoignent. Des écoulements d'eau et la présence de glace ont été observés dans la cicatrice de nombreux écroulements. Dans la face nord des Aiguilles de Chamonix, l'élévation moyenne des cicatrices (3 130 m) est proche de la limite inférieure du permafrost, là où sa dégradation est la plus active. Plus l'été est chaud, plus les écroulements se produisent haut en altitude et plus ils sont fréquents : l'altitude moyenne en 2007-2008 était de 3 250m, en 2003 elle était de 3 500m avec des écroulements survenus jusqu'à 4 150m. L'effet d'exposition joue également : ils se produisent plus haut dans les faces sud que dans les faces nord [Ravanel, 2010 ; 2012]. L'évolution de la cryosphère pourrait ainsi favoriser des interactions entre les processus et nourrir par conséquent des phénomènes en cascade plus fréquents pouvant atteindre en aval des zones urbanisées relativement éloignées de leur point de départ [Huggel et al., 2013]. Par exemple, la chute d'une masse de matériaux (chute de séracs, écroulement rocheux, glissement de terrain) dans un lac glaciaire peut entraîner la vidange du lac dont l'écoulement brutal peut déclencher à son tour une lave torrentielle. L'important apport sédimentaire à un cours d'eau situé à l'aval de ces zones, voire la formation d'un barrage qui peut en résulter, peut générer d'importantes inondations à l'aval.

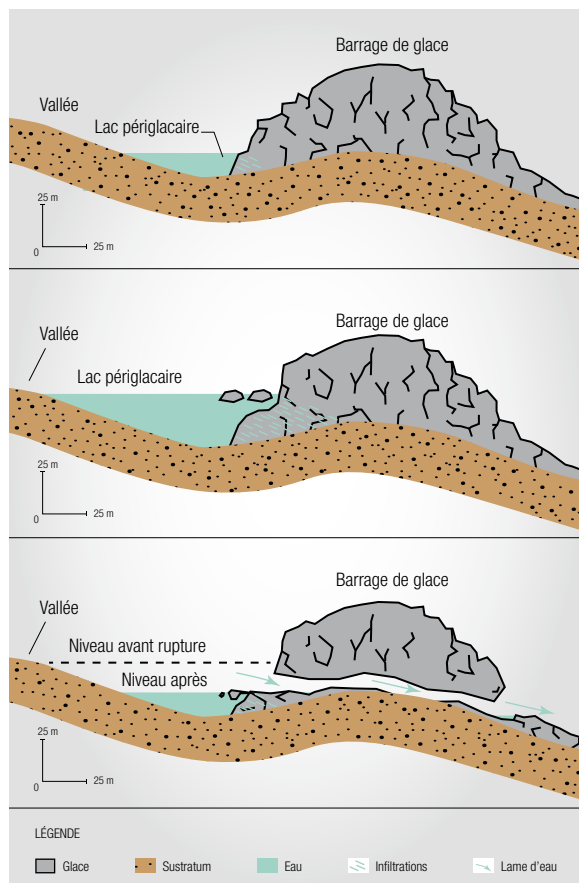


Figure 3 : Désorganisation poche glaciaire © IRSTEA.



En août 2015, sur la commune de Val d'Isère, la vidange brutale d'un lac situé à l'emplacement de l'ancien glacier de la Galise a provoqué la crue soudaine du ruisseau du Niolet, survenue par beau temps ! Ce phénomène atypique montre l'influence probable du seul facteur thermique en l'absence de pluie dans le déclenchement du phénomène. Plusieurs vidanges de poches d'eau probablement sous-glaciaires au cours de l'été 2015 ont également été signalées au glacier des Bossons [Deline et al., 2015]. L'ensemble de ces effets et de leurs interactions sont synthétisés dans le tableau pages 24-25

De tels phénomènes en cascade se sont déjà produits. Le 20 septembre 2002, dans le massif du Kazbek (Ossétie du Nord, Caucase russe), un écoulement rocheux de 5Mm<sup>3</sup> s'est produit sur les flancs du Dzhimarai-Khokh (4 780m). Il a causé le rabotage du glacier de Kolka, entraînant une masse considérable de 95 Mm<sup>3</sup> de glace sous l'impulsion de la masse rocheuse en mouvement. L'avalanche de roche et de glace a parcouru plus de 19 km, puis a été suivie d'une coulée de boue qui a parcouru 15 km supplémentaires et détruit un village dans la vallée de Genaldon/Kardamon en faisant plus de 150 victimes [Huggel et al., 2013 ; PARN, 2012]. Dans les Alpes, le 8 août 2008, une rupture brutale d'une poche d'eau de 15 000 m<sup>3</sup> formée dans le glacier de Mins-tiger (Valais Suisse) a généré une lave torrentielle de 30 000 m<sup>3</sup> qui a atteint le village de Münster et provoqué des dégâts matériels significatifs [PARN, 2012].

La réponse des milieux de montagne au changement climatique est également complexifiée par des processus de rétroaction qui accroissent les difficultés à modéliser ces changements. On peut citer par exemple la rétroaction positive de l'albédo de la neige et de la glace : leur fonte entraîne une plus grande absorption de rayonnement solaire incident par le sol, ce qui accélère le réchauffement climatique [Lebel et Zin, 2015].

La réponse du milieu naturel à un événement climatique donné varie par ailleurs spatialement et temporellement. Par exemple, la réponse de deux cours d'eau à un épisode pluvieux de même durée et intensité ou la réponse d'un cours d'eau à deux épisodes pluvieux identiques se produisant à un intervalle de temps donné ne sera pas la même.

En réponse à l'augmentation des températures moyennes impliquant notamment : (i) une augmentation de la taille et du nombre des lacs glaciaires, (ii) une évolution des glaciers froids en glaciers tempérés<sup>4</sup>, (iii) ou encore une diminution de la stabilité des glaciers suspendus, les phénomènes d'origine glaciaire pourraient se manifester plus fréquemment.

Ces épisodes restent relativement rares, mais sont potentiellement extrêmement destructeurs. Ils sont généralement difficiles à prévoir et le contexte du changement climatique amène à se questionner sur leur évolution [PARN, 2012], ce qui nous conduit à évoquer l'importance des événements extrêmes.

En effet, les changements dans les valeurs extrêmes des précipitations et des températures influencent plus fortement le déclenchement et l'évolution des phénomènes générateurs de risques naturels que les changements enregistrés au niveau des valeurs climatiques moyennes. Or ce sont sur ces valeurs moyennes que portent généralement les études des évolutions climatiques [Richard et al., 2010]. En outre le changement climatique est ponctué d'à-coups imprévisibles et extrêmes qui bouleversent les prévisions d'impacts à partir des tendances moyennes.

La définition d'un « événement climatique extrême » est dépendante du contexte dans lequel il est considéré. Elle peut s'appuyer sur : (i) sa rareté (fréquence d'occurrence), (ii) sa magnitude (dépassement d'un seuil), et (iii) ses impacts environnementaux ou socio-économiques (intensité) évalués en termes de coûts des dommages par exemple [Beniston et Stephenson, 2004].

La fréquence et l'intensité des événements extrêmes risquent d'être accrues. En effet, il est envisagé que l'augmentation des températures favorise une accentuation des épisodes climatiques extrêmes, notamment au travers des deux effets suivants : (i) des changements dans la circulation atmosphérique ayant pour conséquence une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et des sécheresses, (ii) une atmosphère plus chaude, pouvant contenir plus d'humidité et donc des pluies potentiellement plus violentes [Lebel et Zin, 2015]. Les projections des climatologues réalisées à l'échelle de l'Europe dans le cadre des programmes de recherche ENSEMBLES et EURO-CORDEX confirment ces tendances [ONERC, 2015].

L'activité des aléas naturels résulte donc de la combinaison de processus très variés. Cette combinaison complique l'analyse et nécessite de développer davantage d'études scientifiques.

4 | Les glaciers froids ont une température située en-dessous du point de fusion, leur base est gelée et adhère au lit rocheux. Les glaciers tempérés ont une température partout proche du point de fusion, il en résulte la présence d'eau de fusion à leur base ce qui leur permet de glisser.

## ■ Des incertitudes ■ à prendre en compte

Les observations et les modélisations des paramètres climatiques comportent des incertitudes qui rendent les conséquences du changement climatique sur les risques naturels d'autant plus difficiles à évaluer et à prévoir.

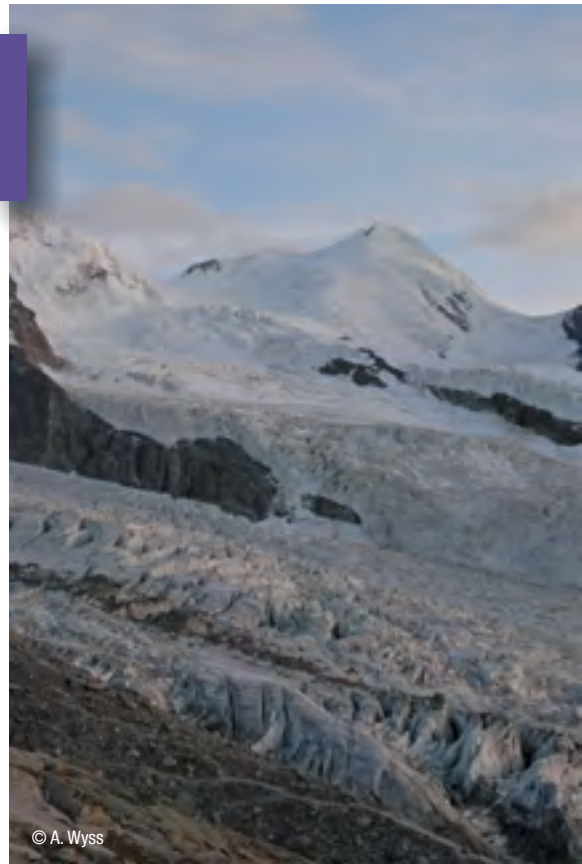
L'évolution du régime des précipitations constitue l'une des sources majeures d'incertitude. Les observations témoignent d'une importante variabilité spatiale et temporelle, tant inter-annuelle qu'inter-saisonnière. En outre la résolution spatiale des modèles de grande échelle des simulations climatiques ne permet pas de représenter l'effet de la topographie sur les précipitations.

Les incertitudes portent notamment sur la vitesse et l'intensité des changements à venir et l'évolution des fortes précipitations. Ainsi, pour les phénomènes ponctuels et pour les événements rares comme les crues avec une longue période de retour, il est difficile de déterminer les changements induits par le climat [Korck et al., 2011].

Par ailleurs, le manque de séries de données suffisamment longues et homogènes sur les paramètres climatiques et les phénomènes naturels ainsi que le manque de connaissances et de compréhension des processus qui les favorisent, font partie des raisons pour lesquelles l'évolution des phénomènes naturels au regard du changement climatique est difficile à caractériser. En effet les données d'observation sur les événements extrêmes sont peu nombreuses et seul un nombre limité de séries de données météorologiques ou hydrologiques sur un temps long est disponible à ce sujet [Korck et al., 2011]. En ce qui concerne les laves torrentielles, les événements sont généralement documentés seulement dans la partie inférieure, la situation dans la zone de départ n'est documentée que dans quelques cas seulement [Schoeneich et al., 2011].

Même s'il est nécessaire de poursuivre les études, une tendance semble s'affirmer.

Les modifications des risques naturels « dépendront au moins autant de l'évolution des vulnérabilités que des changements des aléas » [Einhorn et al., 2015]. Malgré les nombreuses incertitudes concernant le changement climatique et ses conséquences sur les aléas naturels, quelques tendances significatives sont identifiées. L'élévation de la température, le recul des glaciers et la dégradation du permafrost sont clairement établis. Le lien entre le réchauffement et la fréquence des écroulements rocheux en haute montagne semble démontré.



© A. Wyss

Le service de Restauration des Terrains en Montagne témoigne de la hausse de la demande de protection de la part des collectivités et des gestionnaires de domaines skiables [Jean-Yves Lasplaces, Robert Marie, interview]. Mais cette tendance témoigne-t-elle d'une modification de l'activité des aléas naturels ou d'une évolution des modalités de l'acceptation sociale du risque ? En lien avec l'évolution des pratiques et des recompositions sociales et démographiques, l'augmentation de vulnérabilité dans les montagnes tempérées dépend ainsi de plusieurs facteurs. La fréquentation accrue d'espaces soumis à des aléas nombreux et générateurs de phénomènes dangereux (haute montagne, gorges) expose mécaniquement plus d'individus. Corollaire de la présence plus importante en montagne, nourrie notamment par les pratiques sportives et de loisirs, la vulnérabilité comportementale dépend aussi du niveau de sensibilisation des populations et notamment des publics, usagers saisonniers et temporaires de ces espaces. L'absence de mémoire des risques constitue un facteur de fragilité des populations bien connu des spécialistes de cette question qui concerne des situations très variées en montagnes alpines comme méditerranéennes.

## PHÉNOMÈNES NATURELS

## EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

## Effets observés

Chutes de rochers	Écroulements rocheux en haute montagne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrélation établie entre l'augmentation de leur fréquence et l'élévation des températures dans les Alpes</li> <li>• La cause principale très probable est la dégradation du permafrost</li> </ul>
	Chutes de pierres, de blocs et éboulements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de tendance significative concernant l'activité des chutes de pierres et de blocs</li> <li>• Après le passage d'un incendie de forêt : augmentation de la fréquence des chutes de blocs et conséquences sur les distances d'arrêt</li> </ul>
Crués des rivières		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'évolution significative sur les moyennes des volumes et de la fréquence des crués en France</li> <li>• Dans les Alpes, la fréquence des crués extrêmes semble avoir augmenté au cours des vingt dernières années par rapport à la moyenne du XX<sup>ème</sup> siècle.</li> <li>• Augmentation avérée des débits estivaux des cours d'eau à régime glaciaire dans les Alpes</li> <li>• Modification du régime des crués et des étiages dans les Alpes et les Pyrénées en fonction de la date de la fonte nivale et du stock neigeux</li> </ul>
Phénomènes torrentiels	Crués torrentielles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune évolution significative de la composante liquide des crués</li> </ul>
	Laves torrentielles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'évolution significative (fréquence et intensité) dans les zones périglaciaires au cours des dernières décennies</li> <li>• Fréquence plus élevée localement dans les Alpes suisses au XIX<sup>ème</sup> siècle</li> <li>• Diminution de la fréquence dans les massifs des Écrins et du Dévoluy depuis les années 1970</li> <li>• Élévation des zones de départ constatée dans certains massifs (Écrins, Mont Rose)</li> </ul>
Glissements de terrain superficiels		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation du nombre de glissements de terrain superficiels ces deux dernières décennies en Suisse (Romandie et canton du Tessin) corrélée à l'augmentation des précipitations</li> </ul>
Avalanches		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de relation claire entre l'activité avalancheuse et le changement climatique au cours du XX<sup>ème</sup> siècle</li> <li>• Altitude d'arrêt plus élevée ces 30 dernières années (plus d'avalanches de neige humide et moins d'avalanches de neige sèche)</li> <li>• Pas de modification de l'altitude d'arrêt pour les avalanches extrêmes</li> </ul>
Incendies de forêt		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'effet avéré de l'augmentation des canicules sur le nombre d'incendies</li> <li>• Été 2003 : occurrence d'incendies de forêt dans des massifs montagneux qui habituellement ne sont pas affectés en France.</li> </ul>



## Effets potentiels

- Augmentation de la fréquence en lien avec la dégradation du permafrost

- Augmentation de la fréquence dans les zones soumises au phénomène de gel/dégel et diminution dans les zones d'altitude moins élevée

- Inversion de la tendance à la hausse des débits estivaux des cours d'eau à régime glaciaire
- Augmentation de l'intensité et de la fréquence des crues hivernales (liée à l'augmentation attendue des précipitations hivernales et à la réduction de l'effet tampon du manteau neigeux)
- Diminution de l'intensité des crues de fonte printanière

- Augmentation de l'activité torrentielle dans les zones périglaciaires (augmentation de la disponibilité en matériaux du fait de la dégradation du permafrost et potentiellement du recul des glaciers)
- Diminution de l'activité dans les bassins torrentiels situés en-dessous de la zone de permafrost

- Augmentation de la fréquence et de l'intensité : dégradation du permafrost et retrait des glaciers
- Augmentation de la fréquence : dégradations des sols par la multiplication des feux de forêts, augmentation des précipitations
- Stabilisation des versants possible avec l'évolution de la végétation

- Diminution de l'activité avalancheuse à basse et moyenne altitude
- Augmentation de la proportion d'avalanches de neige humide par rapport aux avalanches de neige sèche
- Augmentation de la stabilité du manteau neigeux avec le réchauffement
- Déclenchement d'avalanches à basse altitude et d'avalanches de forte intensité toujours envisageable lors d'épisodes froids associés à de fortes précipitations neigeuses

- Multiplication des feux de forêts (épisodes de sécheresse accentués par l'élévation des températures et la diminution des précipitations estivales)
- Extension des surfaces sensibles aux incendies de forêt

## Facteurs d'incertitude

- Données insuffisantes pour évaluer l'effet de l'augmentation de la température sur les volumes mis en jeu
- Manque d'observations systématiques des événements
- Les processus liant la dégradation du permafrost et les écroulements ne sont pas totalement compris

- Forte variabilité spatiale et temporelle
- Évolution du régime des précipitations comportant de nombreuses incertitudes

- Importance des conditions initiales (taux de saturation des sols, couverture neigeuse et végétale, ...)
- Forte influence des facteurs anthropiques sur l'évolution des régimes hydrologiques

- Facteurs autres que la formation de nouvelles sources de sédiments : variations saisonnières des précipitations neigeuses, augmentation probable de l'intensité des précipitations extrêmes
- Incidence des changements de la végétation sur la quantité de sédiments mobilisés par les torrents

- Forte variabilité temporelle et spatiale
- Imbrications de différentes échelles temporelles : manifestation à court terme des effets de la dégradation du permafrost et à long terme de la décompression post glaciaire

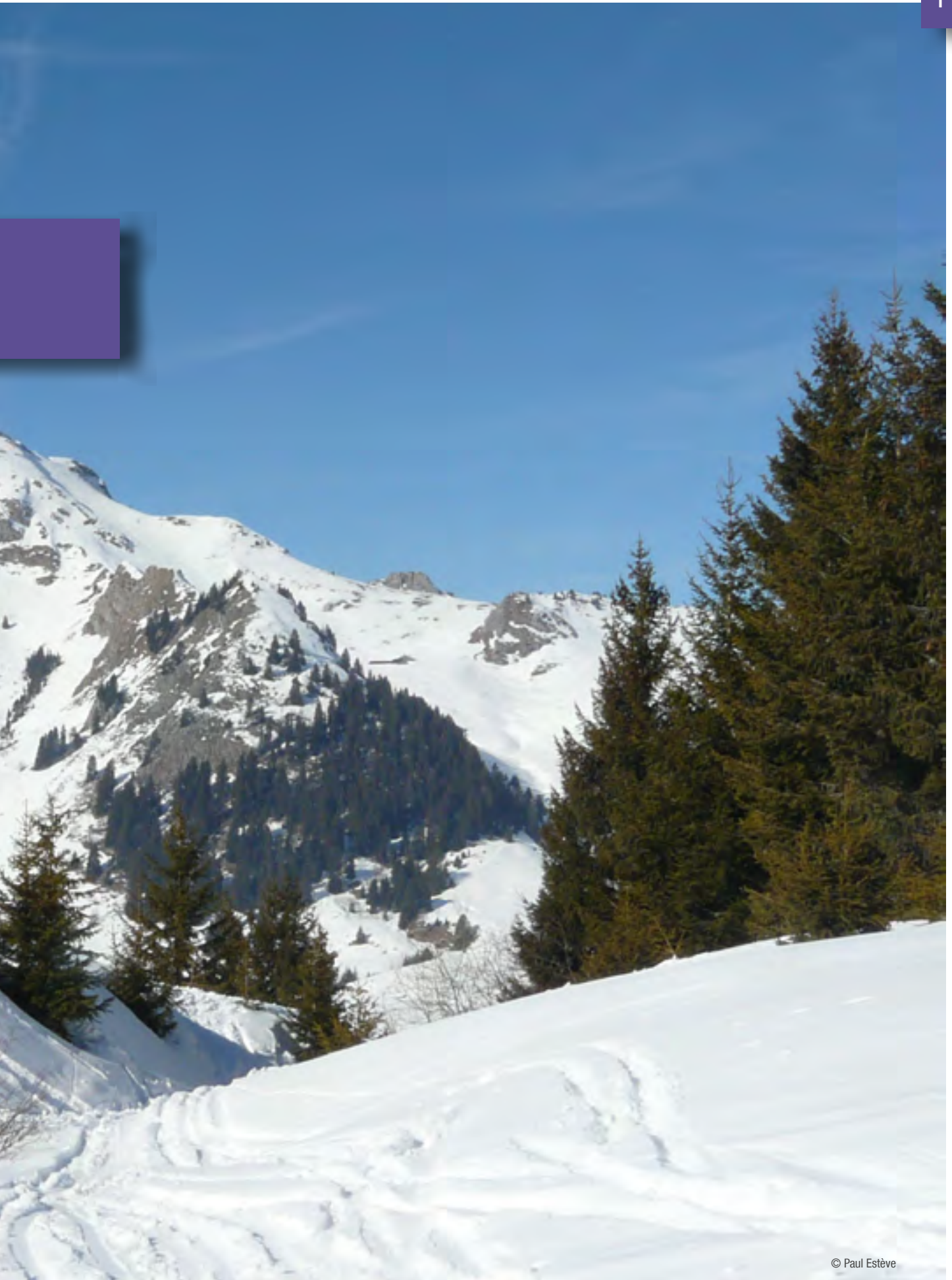
- Variabilité interannuelle élevée
- Manque de séries de données suffisamment longues
- Diversité des types d'avalanches et des variables utilisées pour les caractériser
- Les avalanches sont contrôlées par des facteurs météorologiques à très court terme

- Manque de données permettant d'évaluer l'évolution des feux de forêts en fonction des paramètres climatiques
- Variabilité interannuelle du nombre d'incendies élevée et dépendante de nombreux facteurs dont des facteurs anthropiques

## L'avantage des « solutions fondées sur la nature »

pour gérer les risques





## Les limites de la gestion présente

Face au changement climatique et aux enjeux de gestion des risques naturels, des solutions utilisant les capacités de résilience des écosystèmes existent.



© J. Milián

Les phénomènes naturels ont été craints depuis longtemps par les hommes qui ont appris à vivre avec et s'en sont protégés, le plus souvent par des adaptations de pratiques mais aussi par la construction d'infrastructures de protection. La gestion des risques par des méthodes de génie civil s'avère souvent coûteuse et peut aggraver les risques qu'elle prétend combattre ou restreindre. Les études conduites sur la notion d'« endommagement » soulèvent la question de l'imperméabilisation du sol et de l'artificialisation du territoire, comme en témoignent notamment les récentes inondations cévenoles survenues à l'automne 2015.

En outre ces approches correctives ne répondent pas à la nécessité croissante de préserver la biodiversité et les services écosystémiques qui en dépendent.

Face à la crise de la biodiversité et aux enjeux de gestion des risques naturels, des solutions utilisant la capacité de résilience des écosystèmes sont de plus en plus mises en œuvre. Les qualités et les propriétés de certains écosystèmes sont aujourd'hui utilisées ou étudiées pour gérer certains de ces risques. Ces démarches s'inscrivent dans les initiatives de « solutions fondées sur la nature » s'appuyant sur la capacité des milieux naturels en bon état de conservation à atténuer et à permettre l'adaptation au changement climatique.

Les écosystèmes jouent un rôle crucial dans le cycle global du carbone : s'ils sont préservés, ils sont à la fois d'importants puits

de carbone mais aussi des réserves de carbone. Les écosystèmes naturels à travers le monde absorbent environ la moitié des émissions de CO<sub>2</sub> générées par les activités humaines chaque année. Mais la disparition et la dégradation des milieux naturels contribuent à l'augmentation des gaz à effet de serre. La déforestation et l'artificialisation des sols sont, en effet, à l'origine d'environ 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

### ■ La gestion des risques naturels ■ une histoire ancienne

Les populations implantées en zone de montagne sont de longue date confrontées aux phénomènes naturels qui s'y produisent. Communautés locales et usagers réguliers de la montagne ont souvent développé une grande capacité d'adaptation et d'intégration de ces risques dans leurs pratiques. Dès le Moyen-âge, des réglementations interdisaient le déboisement en Oisans « pour résister aux avalanches et autres incommodités » [Audrechy, 2001]. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, le service Restauration des Terrains en Montagne (RTM) est créé dans l'objectif initial de lutter contre l'érosion et de régulariser le régime des eaux par le reboisement des versants et la correction torrentielle [Institut des Risques Majeurs (a)]. Depuis, ses missions se sont élargies pour prendre en compte l'ensemble des risques inhérents aux milieux monta-

gnards ; il constitue aujourd'hui un service spécialisé de l'Office National des Forêts (ONF) implanté dans six départements des Alpes et cinq des Pyrénées [Institut des Risques Majeurs (a)]. Depuis sa création, le service RTM expérimente et agit dans deux domaines complémentaires : les travaux de génie biologique et de génie civil. L'utilisation des écosystèmes et des mécanismes biophysiques dans la gestion des risques n'est donc pas nouvelle.



### ■ Protection active, ■ protection passive et prévention

En matière de protection contre les phénomènes naturels, deux types d'intervention sont classiquement distingués : les ouvrages de protection active visant à empêcher les phénomènes de se produire ou à réduire leur puissance et leur intensité, et les ouvrages de protection passive qui ont pour objectif de limiter ou d'annuler les effets dommageables des phénomènes naturels en protégeant les enjeux. Historiquement, les mécanismes générateurs des phénomènes naturels n'étant connus que de manière empirique, la protection passive a fait son apparition en premier. C'est surtout à partir du XIX<sup>ème</sup> siècle, avec l'essor des connaissances scientifiques, que la protection active s'est développée. Elle est alors considérée comme la méthode idéale pour lutter contre les risques naturels avant que l'on comprenne au XX<sup>ème</sup> siècle qu'elle ne pouvait à elle seule résoudre les problèmes [Antoine et al., 2008]. Le XX<sup>ème</sup> siècle est marqué par un changement dans la perception et la gestion des risques naturels avec la prise en compte croissante de cette question dans les politiques d'aménagement du territoire. Des méthodes fondées sur la prévention se développent, le zonage réglementaire prend de l'importance et des outils de suivi et d'information sont mis en place dans de nombreux pays montagnards européens comme la France, la Suisse ou encore l'Italie. En France par

exemple, l'information préventive des citoyens, visant à favoriser la prise de conscience des risques et à réduire les vulnérabilités, constitue un axe majeur de la politique de prévention des risques naturels. De nombreux documents sont ainsi disponibles à la consultation et diffusés [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (a)].

### ■ Adaptation ■

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes est l'une des conséquences probables du changement climatique. À titre d'exemple, plusieurs crues cinquantennales, ou supérieures, se sont répétées ces dernières années dans des bassins-versants à régime nivo-pluvial, comme celui de l'Adour : 19 et 20 octobre 2012, 18 et 19 juin 2013 et 4 juillet 2014 [Observatoire de l'eau du bassin de l'Adour, 2014]. Cette série d'événements indique-t-elle une tendance ? Elle amène en tous les cas des experts et des praticiens de terrain à se questionner sur la nécessité de majorer l'évènement de référence servant de repère pour la gestion du risque afin de tenir compte de la hausse constatée des phénomènes à forts impacts [Jean-Yves Lasplaces, interview]. Ces interrogations sont en partie traduites dans la préparation des cartes d'aléas et notamment dans la discussion sur l'interprétation des seuils de référence à privilégier [Robert Marie, interview].

Face à la variabilité et à l'incertitude concernant les impacts du changement climatique, les mesures d'adaptation doivent privilégier les solutions fondées sur la nature, car en protégeant les écosystèmes nous maintenons des réservoirs de carbone mais aussi les capacités de résilience des écosystèmes face à un environnement changeant.



## Les expériences de solutions fondées sur la nature



© J. Milian

### ■ Le concept de ■ solutions fondées sur la nature

« Les solutions fondées sur la nature (« nature based solutions ») sont les solutions qui utilisent les écosystèmes afin de relever les défis globaux tels que la lutte contre le changement climatique, l’approvisionnement alimentaire et le développement économique et social » [Comité français de l’UICN]. Les solutions fondées sur la nature constituent une alternative (seules ou combinées) au développement d’infrastructures ou à l’emploi de technologies de génie civil, dans les stratégies d’atténuation et d’adaptation au changement climatique. Elles présentent aussi un rapport coûts/bénéfices avantageux comparé aux investissements technologiques ou la construction et l’entretien d’infrastructures, et permettent le maintien des services fournis par les écosystèmes qui procurent de multiples avantages pour le bien-être humain. Ces solutions doivent être mises en œuvre sur une emprise spatiale large et sur le long terme.

Nous présentons ici quelques exemples d’expériences et de réalisations accomplies mettant en œuvre ce type de démarche.

### ■ Les forêts de protection, ■ des sentinelles contre les phénomènes érosifs et les avalanches

De façon historique, l’Homme a utilisé la forêt pour se protéger contre les risques naturels en montagne. En 1922, le statut de forêt de protection est créé en France pour lutter notamment contre l’érosion et les risques naturels en zones de montagne et l’invasion des eaux et des sables en zones côtières. Le classement a été élargi en 1976 aux forêts dont le maintien s’impose pour des raisons écologiques ou pour le bien-être des populations pour les forêts péri-urbaines [Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt]. En 2011, 1 % de la surface forestière métropolitaine (150 410 ha) était concernée par ce statut [Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 2011] et à la fin de l’année 2007, 42 % des classements concernaient des forêts de montagne [Aten].

Mais ce rôle protecteur des forêts sera probablement altéré sous l’influence du changement climatique. Ces changements environnementaux devraient en effet impacter la croissance et la santé des arbres et entraîner une remontée



© J. Milian

en altitude de la limite supérieure de la forêt ainsi que des changements dans la distribution des essences. Ils devraient également provoquer une recrudescence des agents pathogènes et des insectes ravageurs. Le changement climatique amène ainsi les gestionnaires forestiers à se questionner sur les ajustements à réaliser pour garantir le maintien des fonctions assurées par la forêt. Cependant, il est difficile d'estimer les effets du changement climatique sur ces fonctions puisque de nombreuses incertitudes subsistent concernant la capacité d'adaptation des espèces végétales à ce changement climatique [Jean-Yves Lasplaces, Frédéric Berger ; interview].

Dans ce contexte, divers acteurs du milieu forestier des massifs pyrénéen et alpin s'associent et développent des projets transfrontaliers visant à comprendre et à évaluer les effets potentiels du changement climatique sur les écosystèmes forestiers afin de définir des stratégies de gestion adaptative de la forêt. La démarche collective de ces projets est assez innovante dans la mesure où elle amène des acteurs à coopérer, alors qu'ils peuvent avoir des objectifs divergents.

C'est le cas du projet européen MANFRED qui a regroupé des partenaires scientifiques, politiques et administratifs des six principaux pays de l'arc alpin. La principale conclusion des études menées est que la fonction de protection des forêts de montagne devrait être renforcée au cours des cent pro-

chaines années. Il a notamment été établi qu'une augmentation d'environ 25 % de la superficie couverte par les forêts à fonction de protection devrait avoir lieu d'ici un siècle dans l'arc alpin en réponse aux modifications naturelles présumées de la répartition des espèces forestières [MANFRED, 2013].

Dans les Pyrénées, l'exemple du projet OPCC-POCTEFA, projet transfrontalier de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC)<sup>5</sup> développé dans le cadre du Programme Opérationnel de Coopération Territoriale Espagne-France-Andorre (POCTEFA) 2007-2013 a regroupé douze partenaires autour de plusieurs thématiques comme « la Forêt » et « les Risques naturels » depuis 2012. L'axe « Forêt » a évalué les effets du changement climatique sur la forêt de protection en montagne et les écosystèmes forestiers en général. Afin de poursuivre ce suivi, un réseau de placettes permanentes permettant un suivi à long terme a été défini sur l'ensemble du massif des Pyrénées [Royer et al., 2014]. L'axe « Risques naturels » a permis d'établir des cartes de maîtrise des aléas par les peuplements forestiers. Les impacts éventuels du changement climatique sur les essences et sur le rôle de protection de la forêt ont ensuite été estimés, permettant ainsi aux gestionnaires forestiers de déterminer sur quels peuplements forestiers il est nécessaire d'agir en priorité pour garantir le maintien du rôle de protection contre les aléas naturels [OPCC].

5 | L'OPCC, créé le 14 janvier 2010 par la Communauté de Travail des Pyrénées, a pour objectif le suivi du changement climatique à l'échelle du massif pyrénéen et la mise en œuvre d'actions adaptées permettant d'une part d'en atténuer les effets et d'autre part de s'y adapter.

## ■ La lutte contre ■ les phénomènes érosifs par la re-végétalisation

Les aménagements réalisés en montagne pour les activités économiques fragilisent le couvert végétal et accroissent la vulnérabilité des sols à l'érosion.

Depuis les années 1970, des techniques de re-végétalisation sont développées notamment pour lutter contre l'érosion des sols liée aux aménagements des stations de ski [Gaucherand, 2014]. Cependant, ces techniques utilisent souvent des semences non locales qui présentent certains inconvénients. En effet, ces semences exogènes ne sont pas bien adaptées aux conditions climatiques et à la pauvreté des sols des milieux montagnards. Elles nécessitent par conséquent un apport important de fertilisant et dépérissent généralement au bout de quelques années. De plus, elles sont sources de perturbations écologiques : elles présentent un risque d'hybridation et de compétition avec la flore locale conduisant à une perte de la diversité génétique des communautés végétales et à une artificialisation des paysages [Brice Dupin, interview].

C'est pourquoi, des démarches de restauration écologique durable fondées sur l'utilisation de semences locales se mettent progressivement en place. Dans les années 1980,

le Parc National des Pyrénées et le CEMAGREF (aujourd'hui IRSTEA) de Grenoble ont initié la mise en culture d'espèces alpines et subalpines pour une utilisation en re-végétalisation. Dans les années 1990, un groupe d'intérêt scientifique « semences natives » est créé dans les Alpes [Gaucherand, 2014].

Depuis le début des années 2000, le Conservatoire botanique national des Pyrénées et de Midi-Pyrénées (CBNPMP) promeut des pratiques de re-végétalisation visant à lutter contre l'érosion des sols tout en préservant la flore pyrénéenne et les milieux naturels. Le programme Ecovars qu'il anime depuis 2003 rassemble de nombreux acteurs de l'ensemble du massif pyrénéen (domaines skiables, collectivités, organismes forestiers, agriculteurs, partenaires scientifiques, techniques et financiers...). Ce programme prône l'utilisation de semences sauvages pyrénéennes dans les pratiques de restauration écologique, facteur déterminant de la réussite des travaux de re-végétalisation. Les espèces choisies sont des espèces de prairies et de pelouses d'altitude qui ont une capacité d'adaptation aux conditions extrêmes des milieux montagnards et qui possèdent un réel potentiel de multiplication [Dupin et *al.*, 2014].

Dans les Alpes françaises et italiennes, le développement d'une filière de production et d'utilisation de semences locales est en cours de structuration. L'IRSTEA et l'Institut Agri-





cole Régional de la Vallée d'Aoste se sont associés et ont développé, dans le cadre du programme franco-italien Alcotra, le projet Alp'Grain. Outre la reconstitution durable d'un couvert végétal dans le cadre des travaux d'aménagement, la mise en place d'une filière de production de semences locales pourrait permettre de diversifier les sources de revenus des agriculteurs impliqués et de revaloriser des espaces agro-pastoraux abandonnés ou sous-exploités. La première phase du projet qui consistait à évaluer la faisabilité technique et économique de la création d'une filière de récolte de semences locales est achevée. Il s'agit dorénavant de mettre en place la filière de production de semences locales en recrutant les différents acteurs et en assurant leur coordination [IRSTEA].

Des filières pour la production de semences locales destinées à la restauration écologique existent également en Autriche, en Suisse ou encore en Allemagne.

Dans la perspective d'une modification du régime des précipitations avec des pluies hivernales potentiellement plus importantes et des épisodes intenses plus fréquents, la mise en œuvre d'actions pour lutter contre l'érosion des sols est fondamentale. L'utilisation de semences locales dans les techniques de restauration écologique permet la reconstitution du couvert végétal avec des avantages pour la biodiversité et apparaît ainsi être une solution efficace.

## ■ Avantages ■ des milieux humides pour atténuer les crues et inondations

Les milieux humides, souvent riches en biodiversité notamment endémique, jouent un rôle important dans l'adaptation aux effets induits par le changement climatique et son atténuation. En effet, les zones humides, en emmagasinant de l'eau lors des épisodes de précipitations intenses, permettent de diminuer l'intensité des crues et d'éviter ou de prévenir les inondations. Elles constituent également des réservoirs d'eau pendant les périodes de sécheresse, l'eau stockée venant alimenter les cours d'eau et les nappes phréatiques lors de ces périodes [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (b)].

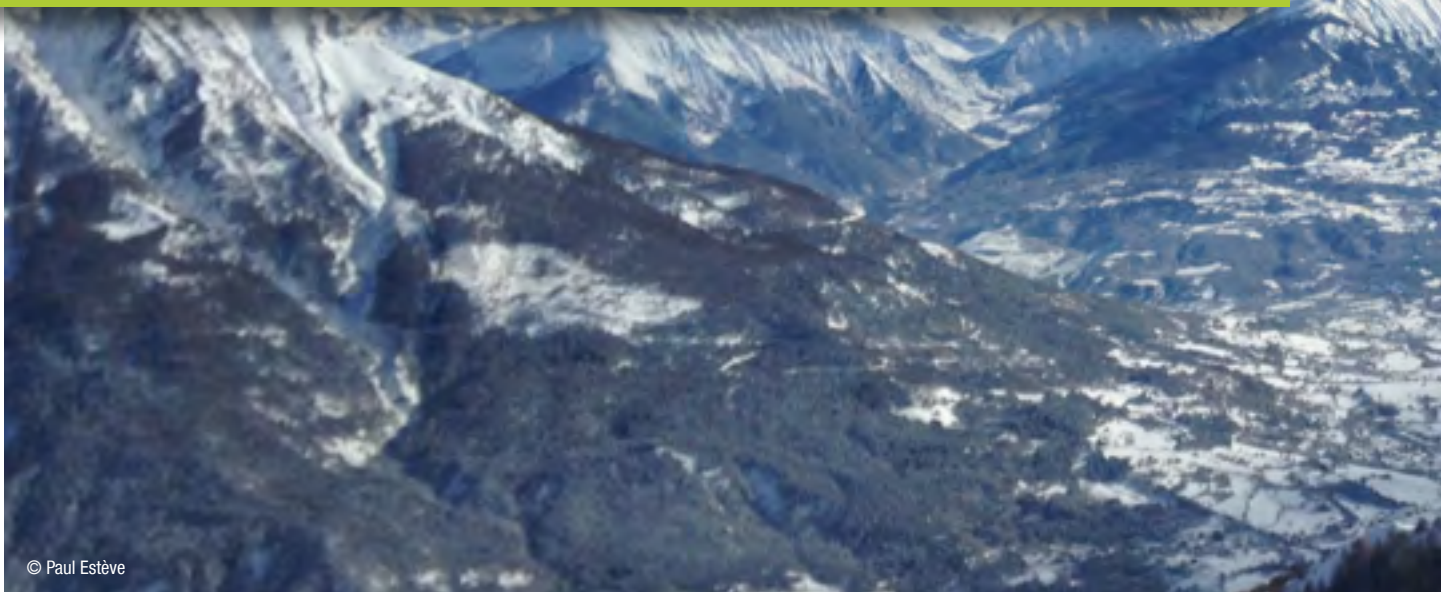
Plusieurs projets de restauration de ces écosystèmes ont ainsi vu le jour, comme celui mené par le Conseil Général de l'Aude qui a racheté en 2010 la forêt de Bac Pégullier située sur la face nord du pic du Madrès (commune d'Escouloubre). Cette forêt de 63,5 ha comporte trente-six tourbières menacées d'assèchement par des épicéas plantés dans les années 1960 lors de la campagne nationale de reforestation. Début septembre 2014, le Conseil Général a engagé des travaux pour retirer les épicéas sur deux parcelles à visée expérimentale. Des relevés botaniques seront réalisés durant



plusieurs années afin d'étudier l'évolution du milieu. Désormais, le Conseil Général a pour projet d'étendre ces travaux à d'autres tourbières [Saur, 2015].

Plus que les autres types de zones humides, les tourbières jouent un rôle primordial dans l'atténuation du changement climatique. En effet, les tourbières constituent des puits de carbone très efficaces pour la planète : à l'échelle mondiale, les tourbières ne couvrent que 3 % de la surface terrestre mais stockent deux fois plus de carbone que les forêts (qui couvrent elles 30 % de la surface terrestre) [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (b)]. La préservation des zones humides apparaît donc comme une des solutions à mettre en œuvre pour faire face aux effets du changement climatique. Cependant les zones humides sont toujours menacées par l'artificialisation et l'assèchement. A titre d'exemple, au XX<sup>ème</sup> siècle, deux tiers des zones humides des bassins des zones Rhône-Méditerranée et Corse ont disparu [Pôle-relais tourbières, 2015].

## CONCLUSION



© Paul Estève

Le changement climatique entraîne une modification des paramètres climatiques de référence, en même temps que des changements rapides de l'environnement montagnard. Avec la poursuite du réchauffement climatique, on s'attend en particulier à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, les sécheresses et les épisodes de précipitations intenses. Les régions de montagne sont particulièrement sensibles à ce type d'épisodes météorologiques qui jouent souvent un rôle prépondérant dans la préparation et le déclenchement de nombreux aléas naturels.

Même si les observations ne révèlent pas de tendance généralisée, on constate localement ces dernières années une recrudescence et une intensification de phénomènes liés à des épisodes météorologiques extrêmes, voire l'apparition de phénomènes nouveaux. On constate en particulier durant les étés chauds une multiplication des écoulements rocheux en altitude, des déstabilisations de glaciers et de glaciers rocheux, une intensification des crues torrentielles, ou encore l'apparition de situations de feux de forêt généralisés... Des changements plus progressifs sont également perceptibles dans la saisonnalité ou la localisation des phénomènes : décalage des pics de crues de fonte nivale et glaciaire, augmentation de la

proportion d'avalanches de neige humide, remontée en altitude des zones de départ de laves torrentielles [Einhorn et al., 2015].

Sous l'effet du changement climatique, les risques naturels tendent à se modifier et à s'amplifier ; les stratégies de gestion de ces risques sont donc à adapter à ce contexte changeant.

La connaissance et la compréhension des processus impliqués dans la dynamique des phénomènes naturels comportent des incertitudes et prendre en considération le changement climatique en ajoute de nouvelles [Einhorn, Peissier, 2011]. Mais les incertitudes ne doivent pas constituer une raison à l'inaction. Améliorer la prise en compte du changement climatique dans les politiques de gestion des risques est nécessaire. Pour ce faire, le développement d'une politique de gestion intégrée des risques qui « consiste à prendre dans leur ensemble les problèmes de prévention, de protection, d'alerte, de gestion de crise et de gestion post-crise par des retours d'expérience, et à faire mieux travailler ensemble les différents acteurs » [Einhorn, Peissier, 2011] apparaît comme fondamental.



Plusieurs domaines d'action sont à approfondir pour espérer renforcer l'adaptation au changement climatique. Le renforcement de la collecte de données et l'intensification de la surveillance des phénomènes s'imposent pour améliorer la compréhension des évolutions des phénomènes climatiques et des aléas naturels.

Par ailleurs, l'adaptation aux impacts du changement climatique nécessite le développement de la concertation, du partage d'informations et des échanges de bonnes pratiques entre tous les acteurs (politiques, économiques, scientifiques, associatifs...). Il s'agit notamment de prendre en compte non seulement les approches du génie civil mais aussi celles des sciences naturelles et des sciences sociales puisque l'évolution des risques est aussi bien liée aux modifications des aléas naturels qu'à celles des vulnérabilités des populations humaines. Un point crucial concerne la sensibilisation des populations pour garantir le maintien d'une culture de la prévention des risques, l'éducation des plus jeunes étant essentiel pour favoriser la démarche [Einhorn, Peissier, 2011 ; Korck et al., 2011].

Dans ce contexte, il est primordial de mettre en valeur les solutions fondées sur la nature, utilisant la capacité de

**résilience des écosystèmes.** Ces solutions soulignent la contribution des milieux naturels en bon état de conservation à la lutte contre les effets du changement climatique et à la gestion des risques naturels. Par exemple des solutions sont offertes par le milieu naturel pour faire face aux risques liés à la ressource en eau (inondation et sécheresse) qui ont notamment de fortes conséquences sur les activités économiques (tourisme, agriculture, transport...). Ainsi les zones humides retiennent l'eau lors de pluies intenses, limitent la puissance des crues et laves torrentielles, et réduisent l'érosion qui entraîne la terre dans les cours d'eau et impacte la pêche, les activités d'eau vive, la baignade, etc. Elles apportent des solutions de gestion des inondations moins coûteuses et plus durables tout en offrant des habitats naturels pour la faune et la flore aquatiques.

**Des milieux naturels en bonne santé permettent donc de réduire l'exposition des populations humaines aux risques naturels.** Les solutions fondées sur la nature, telles que définies par l'UICN, permettent non seulement de contribuer à la lutte contre le changement climatique mais aussi de préserver la biodiversité. Elles représentent de nouvelles opportunités pour répondre aux enjeux du changement climatique et de gestion des risques naturels.

## Bibliographie

- Angeliaume, A. (2011).** L'eau : atout (et contrainte) pour l'agriculture de montagne. In : Antoine, J.-M., Milian, J. La ressource montagne : Entre potentialités et contraintes. Paris : L'Harmattan, 61-86
- Antoine, J.-M., Desailly, B., Galtié, J.-F., Gazelle, F., Peltier A., Valette, P. (2008).** Les mots des risques naturels. Toulouse : Presses Universitaires du Mirail, 128 p.
- Antoine, J.-M., Desailly, B., Peltier, A. (2009).** Sources historiques et problématiques de recherche en géographie des risques naturels. Géocarrefour, 84 (4), 229-239
- Antoine, J.-M., Milian, J. (2011).** La ressource montagne : Entre potentialités et contraintes. L'Harmattan, 287 p.
- Aten.** Outils juridiques pour la protection des espaces naturels, Cahiers techniques n° 78, Forêt de protection. <http://ct78.espaces-naturels.fr/foret-de-protection#donnees>
- Audrechy, D. (2001).** Vivre en montagne avec les risques naturels : comprendre, observer, s'adapter. Paris : Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, 43 p.
- Beniston, M., Stephenson, D.B. (2004).** Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44, 1–9.
- Berger F., Dorren L., Kleemayr K., Maier B., Planinsek S., Bigot C., Bourrier F., Jancke O., Toe D. et Cerbu G. (2013),** « Chapitre 12 : Eco-Engineering and Protection Forests Against Rockfalls and Snow Avalanches », in *Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks*, Gillian Ann Cerbu, Marc Hanewinkel, Giacomo Gerosa et Robert Jandl (éds), ISBN 978-953-51-1194-8, InTech, August 8, 2013.
- Bogataj (2007).** How will the Alps respond to climate change? : Scenarios for the future of alpine water. *alpine space - man & environment*, vol. 3, 43-51
- Boudières V., Peisser C. (2013a).** Plan de propositions d'actions scientifiques et techniques, pour une meilleure prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP). PARN
- Chatry, C., Le Gallou, J.-Y., Le Quentrec, M., Lafitte, J.-J., Laurens, D., Creuchet, B. (2010).** Rapport de la mission interministérielle : Changement climatique et extension des zones sensibles au feu de forêt, CGAAER, IGA et CGEDD, 90 p.
- Chauvin, S., Maugard, F. (2013).** Les phénomènes naturels et la forêt pyrénéenne : Synthèse et glossaire, 52 p.
- Clague, J.J., Huggel, C., Korup, O., McGuireet, B. (2012).** Climate Change and Hazardous Processes in High Mountains. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69 (3), 328 – 338
- Comité français de l'UICN.** Des solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques. <http://www.uicn.fr/Solutions-fondees-sur-la-nature.html>
- Deline, P., Ravanel, L. (2010).** Permafrost and Rockfalls, Case studies: France. In: Schoeneich P., Dall'Amico M., Deline P., Zischg A. (2011). Hazards related to permafrost and to permafrost degradation. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8, 73-76
- Deline P., Gardent M., Le Roy M., Magnin F., Ravanel L. (2015).** Les évolutions de la cryosphère alpine et leurs effets. *Nature et Patrimoine en Pays de Savoie*, n°47, spécial changement climatique, novembre 2015, pages 26-31.
- Déqué M. (2012).** Compte-rendu de fin de projet : Projet ANR-08-VULN-0009-01, Scampeï, Programme VMCS 2008
- Dupin B., Malaval S., Couëron G., Cambecedes J., Largier G. (2014).** Comment reconstituer la flore en montagne pyrénéenne ? : un guide technique de restauration écologique, Conservatoire botanique national des Pyrénées et de Midi-Pyrénées, Bagnères de Bigorre, 116 p.
- Eau France.** Les tourbières. <http://www.zones-humides.eau-france.fr/entre-terre-et-eau/diversite-des-milieus-humides/en-france-metropolitaine/schema-diversite-d-20>
- Eckert, N. (2011).** Impact du changement climatique sur les avalanches. In : Einhorn B., Peissier C. Actes du séminaire international d'experts « Adaptation de la gestion des risques naturels face au changement climatique » : Transcription intégrale des présentations et discussions, validée par les auteurs. PARN, 26/01/2011, Domancy (Haute-Savoie, France), 61-63
- Einhorn, B., Eckert, N., Chaix, C., Ravanel, L., Deline, P., Gardent, M., Boudières, V., Richard, D., Vengeon, J.-M., Giraud, G., Schoeneich, P. (2015).** Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes : Impacts observés et potentiels sur les systèmes physiques et socio-économiques. *Revue de géographie alpine*, 103 (2)
- Einhorn B., Peissier C. (2011).** Actes du séminaire international d'experts « Adaptation de la gestion des risques naturels face au changement climatique » : Transcription intégrale des présentations et discussions, validée par les auteurs. PARN, 26/01/2011, Domancy (Haute-Savoie, France), 75 p.

**European Environment Agency (2009).** Regional climate change and adaptation: The Alps facing the challenge of changing water resources. Report No 8/2009, p. 17-29

**Gaucherand, S. (2014).** Les enjeux de la revégétalisation de 1970 à aujourd'hui dans les Alpes françaises : vers davantage de biodiversité. Journée d'échange sur la récolte et l'utilisation des semences locales de montagne, IRSTEA, 13/06/2014, la Plagne (France)

**GlaRiskAlp.** Inventaire des extensions actuelle et ancienne des glaciers. [http://www.glariskalp.eu/?fr\\_inventaire-des-extensions-actuelle-et-ancienne-des-glaciers,9](http://www.glariskalp.eu/?fr_inventaire-des-extensions-actuelle-et-ancienne-des-glaciers,9)

**Huggel, C., Gruber, S., Korup, O. (2013).** Landslide Hazards and Climate Change in High Mountains. *Treatise on Geomorphology*, 13, 288-301

**Institut des Risques Majeurs (a).** La restauration des terrains en montagne : 1860-2010, 150 ans de lutte contre les risques naturels. [http://www.irma-grenoble.com/05documentation/03phototheque\\_diaporamaRTM.php](http://www.irma-grenoble.com/05documentation/03phototheque_diaporamaRTM.php)

**Institut des Risques Majeurs (b).** Les feux de forêts. [http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/brochure/risques\\_majeurs2007/08Feux\\_de\\_forets.pdf](http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/brochure/risques_majeurs2007/08Feux_de_forets.pdf)

**IRSTEA.** Revégétaliser la montagne : une filière de semences locales dans les Alpes ? <http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/departement-territoires/montagne-semences-locales-alpgrain-filiere>

**Keiler, M., Knight, J., Harrison, S. (2010).** Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *The Royal Society*, 368, 2461–2479

**Korck, J., Mayer, B., Rudolf-Miklau, F., Greminger, P., Zischg, A., Damm, M. (2011).** Climate adaptation and natural hazard management in the Alpine Space: Final Report. *AdaptAlp*. §1.1, §2.2, §2.3

**Lebel T., Zin I. (2015).** Impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les risques liés à la sécheresse et les inondations. Sur les traces du GIEC, Groupe COP21-UGA, 28/04/2015, Grenoble

**Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremonese, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L., (2011):** PermaNET – Réseau d'observation du permafrost sur le long terme. Rapport de synthèse. INTERPRAEVENT Série de publications 1, Rapport 3. Klagenfurt.

**MANFRED Project Alpine Space (2013).** Protection and sustainable management of forest ecosystems (EN) Part 1. <https://www.youtube.com/watch?v=CUAwmP8BsuM>

**Mélières M.-A. (2014).** Changement climatique : du Global au Régional

**Météo France (a).** Changement climatique et enneigement. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydro-meteorologiques/changement-climatique-et-enneigement>

**Météo France (b).** L'enneigement en montagne durant l'hiver 2012-2013. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2013/l-enneigement-en-montagne-durant-l-hiver-2012-2013>

**Météo France (c).** Changement climatique et feux de forêts. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydro-meteorologiques/changement-climatique-et-feux-de-forets>

**Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. Forêt - Bois.** <http://agriculture.gouv.fr/foret-bois>

**Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (2011).** Liste des massifs forestiers classés en forêt de protection

**Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (a).** La politique de prévention des risques naturels. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Education-et-information,24011.html>

**Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (b).** Les zones humides à l'honneur le 2 février. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-zones-humides-a-l-honneur-le-2.html>

**Moraine, l'Association Pyrénéenne de Glaciologie (2010).** Les glaciers des Pyrénées françaises : Rapport d'étude 2009-10. 27 p.

**Moraine, l'Association Pyrénéenne de Glaciologie.** Evolution récente. <http://asso.moraine.free.fr/index.php/les-glaciers-des-pyrenees/evolution-recente/>

**NRCC (Permafrost Subcommittee), (1988).** Glossary of permafrost and related ground-ice terms. Technical Memorandum, 142. National Research Council of Canada, 156 p.

**Observatoire de l'eau du Bassin de l'Adour (2014).** Bassin de l'Adour : dossier crues 2014, 31 p.

**ONERC (2015).** L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change : Rapport au Premier Ministre et au Parlement. Paris : La Documentation française. 182 p.

**OPCC (2013).** Etude sur l'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées : Profil des Pyrénées, 139 p.

**OPCC.** Action 4 Risques Naturels : Rapport exécutif.

**OPCC.** La prise en compte des évolutions climatiques dans les travaux de cartographie du phénomène « glissement de terrain » et dans les travaux d'analyse de la maîtrise des aléas par les peuplements forestiers et la végétation des Pyrénées, 31 p.

**OPCC.** Présentation méthodologique : Indicateur « Evolution surfacique des territoires à fort risque naturels » & Production de « Cartes d'indice de maîtrise des aléas par les peuplements forestiers et la végétation des Pyrénées »

**Parc national des Écrins (a).** Sentinelles du climat. <http://www.ecrins-parcnational.fr/dossier/sentinelles-du-climat>

**Parc national des Écrins (b).** Bilan positif pour le glacier blanc ! <http://www.ecrins-parcnational.fr/actualite/bilan-positif-pour-le-glacier-blanc>

**PARN (2012).** Séminaire technique : Gestion des risques d'origine glaciaire et périglaciaire. Document préparatoire. 12-13/03/2012, Grenoble, 29 p.

**Peltier, A. (2005).** La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale. Etude comparative du Valais (Suisse), de la Vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes Pyrénées (France). Thèse de doctorat : Géographie. Toulouse : Université de Toulouse II, 743 p.

**Pôle-relais tourbières (2015).** Tourbières et changements climatiques. L'écho des tourbières, 21, 24 p.

**Prudent-Richard, G., Gillet, M., Vengeon, J.-M., Descotes-Genon, S. (2008).** Changements climatiques dans les Alpes : impacts et risques naturels. Rapport Technique N°1, ONERC, PGNR, Région Rhône-Alpes, 100 p.

**Ravanel L. (2012).** Les Alpes sont-elles en voie d'écroulement. France Culture, Planète Terre du 12/09/2012

**Richard, D., George-Marcelpoil, E., Boudieres, V. (2010).** Changement climatique et développement des territoires de montagne : quelles connaissances pour quelles pistes d'action ? Revue de Géographie Alpine, 98 (4), 1-13

**Rouyer, E., Marty, P., Chauvin, S. (2014).** Rapport Technique : « Évaluation de l'impact du changement climatique sur l'évolution des écosystèmes forestiers », 140 p.

**Saur N. (2015).** Synthèse de la table ronde 3 : renforcer les défenses des milieux aquatiques face au changement climatique. In : Agence de l'eau RMC (2015). Les Rencontres Rhône Méditerranée : L'adaptation au changement climatique. Synthèse, 29/04/2015, Lyon

**Schoeneich P., Dall'Amico M., Deline P., Zischg A. (2011).** Hazards related to permafrost and to permafrost degradation. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8.

**Société Suisse de Géomorphologie.** Processus liés au gel-dégel (2/2). <https://www.unifr.ch/geoscience/geographie/ssgmfiches/pergelisol/3202.php>

**Station alpine Joseph Fourier.** L'étagement de la végétation en montagne. <https://www.jardinalpindulautaret.fr/jardin/cadre-naturel-exceptionnel/letagement-vegetation-en-montagne>

## Personnes interviewées dans le cadre de la préparation de cette publication

**Anne Peltier** | Laboratoire Geode (Université Toulouse 2)

**Bertrand Desailly** | Laboratoire Geode (Université Toulouse 2)

**Sébastien Chauvin** | GEIE (Groupement Européen d'Intérêt Economique) FORESPIR

**Jean-Yves Lasplaces** | RTM (Restauration des Terrains en Montagne) Pyrénées-Atlantiques/Hautes-Pyrénées

**Freddy Rey** | IRSTEA Grenoble

**Marc-Jérôme Hassid** | CIPRA

**Frédéric Berger** | IRSTEA Grenoble

**Robert Marie** | RTM Isère

**Jean-Guillaume Thiebault** | Parc National des Pyrénées

**Sylvain Rollet** | Parc National des Pyrénées

**Elsa Libis** | CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestières) Midi-Pyrénées

**Brice Dupin** | CBNPMP (Conservatoire Botanique National des Pyrénées et de Midi-Pyrénées)

**Agnès Thiard** | Parc National des Ecrins

**Marie-Antoinette Mélières** | Université Joseph Fourier de Grenoble

**Xavier Bodin** | Laboratoire CNRS EDYTEM (Environnements Dynamiques Territoires Montagnes)

**Baptiste Nettier** | IRSTEA Grenoble

**Clotilde Sagot** | Parc National des Ecrins





## Comité français de l'UICN Union Internationale pour la Conservation de la Nature

Créé en 1992, le Comité français de l'UICN est le réseau des organismes et des experts de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature en France. Il regroupe au sein d'un partenariat original 2 ministères, 13 organismes publics, 41 organisations non gouvernementales et plus de 250 experts, réunis en commissions spécialisées et en groupes de travail thématiques. Il s'est fixé deux missions principales : répondre aux enjeux de la biodiversité et valoriser l'expertise française au niveau international. Par cette composition mixte, le Comité français de l'UICN est une plate-forme unique de dialogue et d'expertise sur les enjeux de la biodiversité, associant également les entreprises et les collectivités locales.

