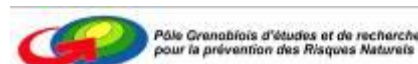


Rhône-Alpes Région



---

Observatoire National sur les Effets du  
Réchauffement Climatique

# Changement climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels

Rapport Technique N°1 de l'ONERC  
Octobre 2008

---

**ClimChAlp**  
Interreg III B Alpine Space

**Rédaction :** Guillaume Prudent-Richard (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), Marc Gillet (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), Jean-Marc Vengeon (Pôle Grenoblois Risques Naturels) et Sandrine Descotes-Genon (Région Rhône-Alpes).

**Contribution opérationnelle :** Benjamin Einhorn (Pôle Grenoblois Risques Naturels), Laurence Bourjot (Bourjot Environnement), Thomas Deniset (Pôle Grenoblois Risques Naturels) et Vincent Bourcier (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) ;

**Contribution rédactionnelle :** Didier Richard (Cemagref/ETNA), Christian Vincent (LGGE), Pierre Etchevers (Météo France/CEN), Stefan Gruber, Wilfried Haeberli, Isabelle Roer et Michael Zempf (Université de Zürich), Nicola Loglisci et Renata Pelosini (ARPA Piemonte), Michel Lang (Cemagref/HH), Charles Obled (LTHE), Jean-Pierre Requillart (ONF/RTM), Daniel Duband (CSM), Denis Jongmans (LGIT), Bruno Schaedler (OFEN), Nicolas Eckert (Cemagref ETNA), Philippe Forcheron (SDIS 38) et également d'autres membres du réseau ClimChAlp WP5 ;

**Relecture :** Martin Beniston (Université de Genève), Martin Price (Centre for Mountain Studies, UHI Millenium Insitute) et François Gillet (Expert MEDAD).

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE.  
*Changements climatiques et impacts dans les Alpes.* Paris : ONERC, 2008. p.

#### **Mention légale**

Le contenu de ce rapport et les arguments employés ne reflètent pas nécessairement les opinions ou la position de l'ONERC ou des organismes contributeurs. La terminologie et les figures utilisées n'impliquent pas l'expression d'une quelconque opinion de la part de l'ONERC, ou des organismes contributeurs à propos des statuts légaux des pays, territoires ou zones ou des autorités ou concernant la délimitation des frontières ou des limites d'une quelconque zone.

Températures



Précipitations



Glaciers



Couverture neigeuse



Permafrost



Végétation



Crués



Crués et laves  
torrentielles



Avalanches



Mouvements de  
terrain



Risques glaciaires



Tempêtes



Feux de forêts



## Liste des sigles

**ALP-IMP** : Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data (Variabilité multiséculaire dans les Alpes basée sur des données instrumentale, des simulations de modèles et des données Proxy)

**ARPA-Piemonte** : Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente della Piemonte (Agence régionale pour la protection de l'environnement du Piémont, Italie)

**AR4** : IPCC Fourth assessment report (2007) (Quatrième rapport d'évaluation du GIEC)

**BRGM** : Bureau des risques géologiques et miniers

**Cemagref** : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

**CEN** : Centre d'étude de la neige de Météo France

**CESR** : Conseil économique et social de la Région

**CETE** : Centre d'étude technique de l'équipement

**CSM** : Conseil supérieur de la météorologie

**CUDAM** : Centro universitario per la difesa idrogeologica dell'ambiente montano (Centre universitaire pour la protection hydrogéologique de l'environnement de montagne, Italie)

**DJF** : Décembre-Janvier-Février

**DTM** : Développement des territoires de montagne (Division du Cemagref)

**EA** : East Atlantic pattern (Régime Atlantique Est)

**EAWR** : East Atlantic West Russia pattern (Régime Atlantique Est – Ouest de la Russie)

**e.e** : équivalent eau

**ENSO** : El Nino Southern Oscillation (Oscillation Sud d'El Nino)

**EPA** : Enquête permanente sur les avalanches

**ETNA** : Érosion torrentielle, neige et avalanche (Division du Cemagref)

**E & F** : Service des eaux et forêts

**FMS** : Fondazione montagna sicura (Fondation Montagne Sûre, Italie)

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**GLACIORISK** : Étude des risques glaciaires extrêmes dans les régions de montagne européennes

**GLOF** : Glacial lake outburst flooding (vidange de lac glaciaire)

**HH** : Hydrologie-hydraulique (Division du Cemagref)

**IGC** : Italian glaciological committee (Comité italien de glaciologie)

**IGN** : Institut géographique national

**INRA** : Institut national de recherche agronomique

**IPCC** : International panel on climate change (GIEC en anglais)

**IPSL** : Institut Pierre Simon Laplace

**IRMa** : Institut des Risques Majeurs de Grenoble

**JJA** : Juin-Juillet-Août

**KLIWA** : Klimaveränderung und konsequenzen für die wasserwirtschaft (Changements climatiques et conséquences pour la gestion de l'eau, Allemagne)

**LCPC** : Laboratoire central des ponts et chaussées

**LGGE** : Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement de Grenoble

**LGIT** : Laboratoire de géophysique interne et de tectonophysique

**LST** : Laboratoire des sciences de la Terre

**LTHE** : Laboratoire d'étude des transferts en hydraulique et en environnement

**MCG** : Modèle de circulation global

**MES** : Méthodes d'extrapolation statistique

**MEDAD** : Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables

**OFEN** : Office fédéral de l'environnement (Suisse)

**OM** : Optimum médiéval

**ONA** : Oscillation Nord Atlantique

**OAGCM** : Ocean-atmosphere coupled general circulation model (Modèle de circulation global couplé océan-atmosphère)

**OCDE** : Organisation pour la coopération et le développement économique

**ONERC** : Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

**ONF** : Office national des forêts

**PACE** : Permafrost and climate in Europe  
(Pergélisol et climat en Europe)

**PAG** : Petit age glaciaire

**PERMOS** : Permafrost monitoring Switzerland  
(Réseau de surveillance du permafrost en Suisse)

**PGRN** : Pôle grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention et la protection des risques naturels

**PNR 31** : Programme national de recherche N°31 (Suisse)

**RCM** : Regional climate model (Modèle Climatique Régional)

**RTM** : Service de restauration des terrains de montagne (de l'ONF)

**SAI** : Standardized anomaly index (Indice d'anomalie standardisé)

**SCAN** : Scandinavian pattern (Régime Scandinave)

**SDIS** : Service départemental d'incendie et de secours

**SLF** : Institut für Schnee und Lawinen Forschung (Institut Fédéral pour l'Étude de la Neige et des Avalanches à Davos, Suisse)

**SDM** : Statistical downscaling method (Méthode d'extrapolation statistique)

**SRES** : Special reports emissions scenarios of the IPCC (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions du GIEC)

**STARDEX** : Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions (Extrapolation statistique dynamique et régional des extrêmes pour les régions européennes).

**TAR** : Third assessment report of the IPCC (2001) (Troisième rapport d'évaluation du GIEC)

**TORAVAL** : Groupement pour l'ingénierie des risques hydrologiques de montagne (France)

**UCBL** : Université Claude Bernard de Lyon

**VAW** : Versuchsanstalt für wasserbau, hydrologie und glaziologie (Institut de recherche pour l'hydrologie et la glaciologie, Suisse)

**WGMS** : World glacier monitoring service (Service de surveillance des glaciers dans le monde)

**WP** : Work package in the ClimChAlp project (Groupe de travail ClimChAlp)

## Introduction

L'évidence de l'existence de changements climatiques est devenue de plus en plus certaine à mesure que les rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) proposaient des analyses de l'évolution climatique globale au cours des dernières années (1990, 1995, 2001 et 2007).

Il est maintenant largement admis que le réchauffement actuel est dû à la combinaison d'une fluctuation naturelle du climat et, pour une large part, à un forçage radiatif lié aux activités humaines. Ces changements du climat global ont déjà et auront encore des conséquences sur les écosystèmes océaniques et terrestres et des impacts sur les activités humaines.

Toutes les régions ne seront pas touchées de la même manière par les changements climatiques. En Europe, les chaînes de montagne et les espaces côtiers sont parmi les territoires les plus vulnérables aux changements climatiques. De nombreux systèmes et processus naturels (écosystèmes, régime hydrologiques, processus d'érosion, etc.) sont fortement liés à la température et à son évolution. La position en altitude des isothermes est par exemple cruciale pour la distribution des espèces, la localisation des glaciers (via leur ligne d'équilibre), l'extension et la durée de la couverture neigeuse.

De faibles changements dans les moyennes annuelles de température peuvent masquer des changements importants à des pas de temps plus fins (horaires, journaliers voir même mensuels) qui sont pertinents pour le déclenchement d'aléas naturels, la dégradation du permafrost et bien d'autres évolutions.

Un nombre croissant de recul de glaciers, de fonte du permafrost et de diminution de la couverture neigeuse a été observé dans bien des massifs montagneux et plus spécialement dans les Alpes européennes. Ces évidences du changement climatique ont tendance à se multiplier de plus en plus rapidement.

Les sociétés montagnardes, qui doivent déjà faire face à des difficultés émanant de mutations internes et externes, devront dans le futur faire également face à une vulnérabilité climatique<sup>1</sup> de plus en plus contraignante. Les conséquences du changement climatique dans les Alpes vont également avoir des impacts sur les activités socio-économiques en aval qui dépendent notamment des importantes ressources d'eau stockées dans les montagnes.

La compréhension des impacts du changement climatique est indissociable du concept d'incertitude. L'origine de l'incertitude est variée : elle peut être liée à l'observation, à la modélisation, ou encore à la compréhension de la sensibilité climatique des systèmes naturels considérés.

---

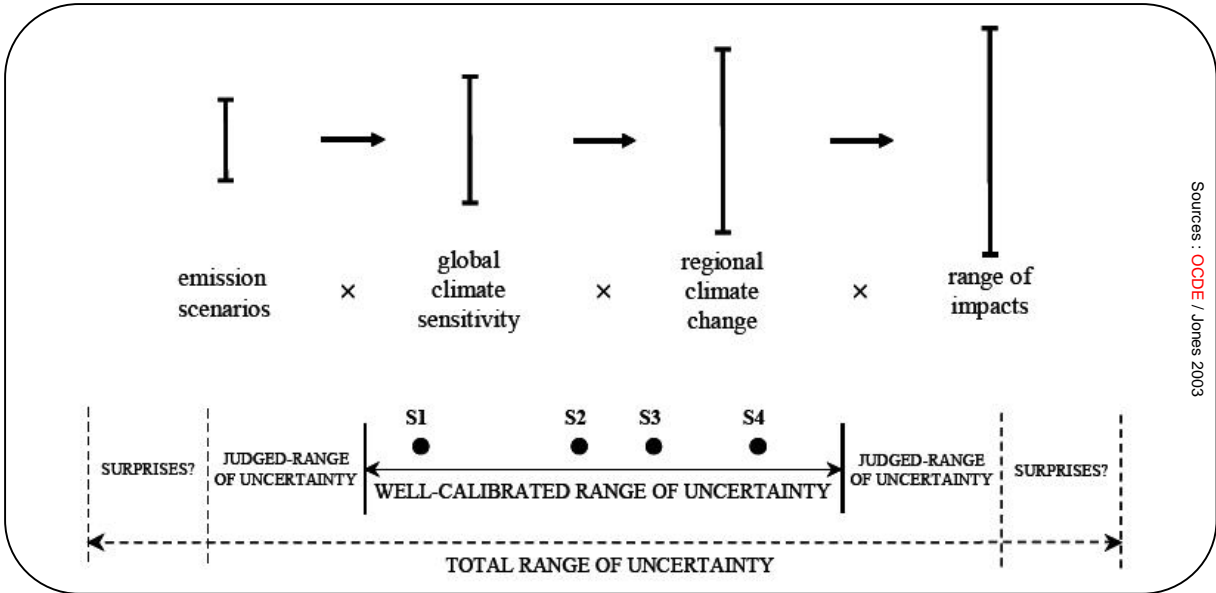
<sup>1</sup> La vulnérabilité au changement climatique est définie par le GIEC comme « le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que sa sensibilité et sa capacité d'adaptation », in *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, 2006*.

D'une manière générale, notre compréhension des impacts décroît avec l'augmentation du nombre de paramètres à intégrer dans l'analyse des impacts (comme cela a été développé par Jones [2000] pour les incertitudes liées aux projections climatiques, cf. fig. 1). Les incertitudes sont parfois très élevées et il est important de bien les identifier.

Afin de faire face aux changements climatiques, nos sociétés doivent réfléchir sans délai, les prochaines années seront cruciales pour la mise en place de stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Les sociétés les plus menacées, comme celle implantées dans les zones de montagne doivent donc évaluer dès maintenant quels sont les changements qui ont déjà affecté leurs territoires, quels sont ceux qui peuvent potentiellement les affecter et quelle est leur marge de manœuvre pour réagir face à de nouvelles contraintes.

L'identification des échéances des changements attendus, qui vont conditionner le calendrier et l'ordre de priorité d'actions d'adaptation ciblées, représente la première étape de la stratégie d'adaptation.

Le présent rapport technique est le fruit du travail concerté entre différentes institutions politiques, techniques et scientifiques qui ont collaboré dans le cadre de ClimChAlp, un projet européen du programme Interreg III B « Alpine Space ». Les résultats de ce projet sont ici exposés afin de proposer une base commune de connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts dans les Alpes.



Sources : OCDE / Jones 2003

Fig.1 – Schéma des incertitudes pour l'évaluation des impacts du changement climatique



## Le projet ClimChAlp

Le projet ClimChAlp « *Climate change, impacts and adaptation strategies in the Alpine Space* » est un projet du programme européen Interreg III B. Ce projet est qualifié de « stratégique » car son partenariat regroupait 22 partenaires (essentiellement les autorités publiques régionales et nationales) des 7 pays alpins et qu'il devait fournir une base solide pour les futurs projets du programme « *Alpine Space* ».

Le projet ClimChAlp a été réalisé entre avril 2006 et mars 2008. Son contenu est basé sur des publications et des modélisations concernant les changements climatiques dans les Alpes ainsi que les impacts observés et potentiels. Le partenaire chef de file était le ministère bavarois pour la santé et l'écologie (*Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Referat Klimaschutz*).

Le projet était divisé en 9 groupes de travail (appelé *Work Package*, WP). Parmi ces 9 groupes, les WP 1 à 4 étaient dédiés à des tâches administratives, de communication et de gestion du budget, le WP 9 était en charge du rapport final de synthèse et les WP 5 à 8 étaient dédiés à différents thèmes comme suit :

- ☞ WP 5. Changement climatique et aléas naturels :
  - Module « Changement Climatique » : synthèse des connaissances existantes, évaluation des changements climatiques passés, évaluation des changements climatiques régionaux et des incertitudes associées, besoins et futurs agendas de la recherche sur ces thématiques.

- Module « Aléas Naturels » : évaluation des changements passés des aléas naturels, évaluation des modifications d'aléas naturels qui peuvent être attribuées au changement climatique, analyse de futurs scénarios d'aléas naturels.
- ☞ WP 6. Surveillance, prévention et gestion des impacts spécifiques du changement climatique sur la Nature : surveillance, télédétection, systèmes d'alerte...
- ☞ WP 7. Impacts du changement climatique sur le développement territorial et l'économie territoriale.
- ☞ WP 8. Réseau de réponse flexible : réflexion sur les possibilités d'adaptation pour les structures administratives et politiques.

L'ONERC et le PGRN (mandaté par la Région Rhône-Alpes) ont été plus particulièrement actifs sur le WP 5 ; la Région Rhône-Alpes s'est également impliquée dans le WP 8. L'ONERC avait en charge le module « Changement Climatique » et le PGRN avait en charge le module « Aléas Naturels » en tant qu'appui technique pour la Région Rhône-Alpes. Les deux organismes ont rédigé des rapports et construit une plate forme de connaissances qui est présentée plus loin dans le rapport.

D'autres partenaires français étaient également impliqués dans d'autres WP. Le Centre d'Étude Technique de l'Équipement (CETE) et le Laboratoire des Sciences de la Terre (LST) participaient au WP 6 tandis que le Cemagref de Grenoble contribuait au WP 7. Des encadrés présentent les activités de ces partenaires français à la fin du rapport.

Dans le cadre du projet ClimChAlp, l'ONERC, le PGRN et la Région Rhône-Alpes ont développé une plate forme de connaissance sur les impacts du changement climatique dans les Alpes, avec l'appui d'un large réseau de scientifiques qui ont apporté des informations et participé aux synthèses et aux relectures. Cet outil est disponible en ligne sur le site Internet du PGRN : [www.risknat.org](http://www.risknat.org)

Le but de cet outil est de proposer une information critique, validée et traçable sur les changements climatiques et leurs impacts, classée de la manière suivante :

Pour chacune de ces thématiques, le contenu est à nouveau distribué entre quatre catégories d'informations selon qu'elles sont issues de reconstructions (reconstitutions paléo-environnementales, approche historique, etc.), d'observations instrumentales ou de modélisations (comme les modèles climatiques régionaux ou les modèles de propagation d'aléas naturels) ou bien encore qu'il s'agisse d'hypothèses.

Ce rapport technique a été réalisé en grande partie à partir de cette plate forme de connaissances. Dans un souci de facilité de lecture, les références scientifiques correspondant aux arguments et aux valeurs proposées dans le texte ne sont pas insérées dans le corps du texte. A la fin du rapport, la liste des références utilisées pour chaque partie est proposée.

Si le lecteur souhaite approfondir une thématique en particulier et retrouver les références associées avec une valeur ou un argumentaire, il peut se rendre sur la plate forme de connaissances ([www.risknat.org](http://www.risknat.org)) afin d'obtenir cette information détaillée.

Modifications des paramètres atmosphériques		
Température	Précipitation	Pression atmosphérique / Vent

Effets sur le milieu naturel							
Écoulements de surface	Enneigement	Écoulements souterrains	Permafrost	Glaciers	Hydrologie	Forêt - végétation	Érosion

Impacts sur les aléas naturels						
Crues	Aléas torrentiels	Avalanches	Mouvements de terrain	Aléas glaciaires	Tempêtes	Feux de forêt

## Les organismes français impliqués dans le WP5 du projet ClimChAlp

### L'ONERC

Créé par la loi du 19 janvier 2001, l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) matérialise la volonté du Parlement et du Gouvernement de prendre en compte les questions liées aux effets du changement climatique. Il collecte les informations, études et recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux événements climatiques extrêmes, afin d'en informer le public et les collectivités territoriales. L'ONERC se base sur ces informations pour proposer des recommandations pour des stratégies d'adaptation au changement climatique. Enfin l'ONERC favorise également le dialogue autour du réchauffement climatique avec les pays en voie de développement.

### Le PGRN

Créé en 1988 dans le cadre de l'opération « Isère Département Pilote » et constamment soutenu depuis par le Conseil Général de l'Isère, le Pôle Grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PGRN) est aujourd'hui un groupement (association loi 1901) de 12 organismes de Rhône-Alpes au sein desquels près de 170 personnes (80 chercheurs ou enseignants-chercheurs, 50 ingénieurs et techniciens et 40 doctorants) orientent leurs travaux vers les risques naturels. Le PGRN met en place des programmes de recherche coordonnés ayant pour but de développer des outils scientifiques et techniques plus performants mis à disposition des gestionnaires des risques. Le PGRN concentre son activité sur des risques liés aux territoires montagnards

comme les avalanches, les mouvements de terrain, l'érosion et les crues torrentielles, les crues des rivières alpines, les séismes et les effets de site, etc.

### La Région Rhône-Alpes

Rhône-Alpes représente le deuxième bassin de vie français avec 10 % de la population nationale, répartie dans 2 879 communes et 8 départements : l'Ain, l'Ardèche, la Drôme, l'Isère, la Loire, le Rhône, la Savoie et la Haute-Savoie. Ses dimensions la placent parmi les 10 plus régions européennes les plus importantes. La collectivité régionale est constituée de deux assemblées : le Conseil Régional qui est une assemblée élue au suffrage universel pour un mandat de 6 ans et le CESR (Conseil Économique et Social Régional) qui est une assemblée consultative regroupant des personnalités du monde socioprofessionnel. Ces deux assemblées sont appuyées par des services techniques. La région Rhône-Alpes s'est notamment donnée pour mission d'informer les citoyens sur les impacts du changement climatique sur le territoire Rhône-Alpes à travers diverses actions, depuis des projets européens jusqu'à des initiatives pour les entreprises locales.



© ONERC / G. Prudent

# Changements climatiques et impacts résultants sur les systèmes naturels dans les Alpes



© ONERC / G. Prudent

# Température

## Observations dans les Alpes

Selon le dernier rapport du GIEC (AR4) : « *warming of the [global] climate system is unequivocal, as it is now evident from observations of increases in global average air snow and ice, and rising global average sea level. Furthermore, 11 of the last 12 years (1995-2006) rank amongst the 12 warmest years in instrumental records of global surface temperature since 1850. The updated linear trend (1906-2005) of 0.74°C is larger than the Third Assessment Report (TAR) linear trend (1901-2000) of 0.6°C. The linear trend for the last 50 years (0.13°C per decade) is nearly twice that for the last 100 years. The total temperature increase from 1850-1899 to 2001-2005 is 0.76°C* ».

Cependant, le réchauffement global documenté dans les rapports du GIEC ne représente qu'une valeur moyenne globale et d'importantes disparités ont été observées à l'échelle locale en terme d'augmentation, et dans quelques cas de diminution de la température. A l'échelle alpine, la majorité des observations de températures convergent vers une augmentation générale de la température. Les valeurs proposées par différentes stations météorologiques dans les Alpes diffèrent en terme de magnitude mais la direction du changement est commune : réchauffement. De plus, cette tendance au réchauffement semble s'être intensifiée au cours de la dernière décennie. La tendance positive de température est également étayée par des caractéristiques communes à l'ensemble de la chaîne alpine : augmentation du nombre de journées estivales chaudes et diminution du nombre de jours de gel.

Malgré le travail important fourni par les scientifiques et les services techniques, des incertitudes demeurent, même concernant les observations. Les séries de température ne sont pas toujours homogènes et continues. Certaines stations météorologiques ont été déplacées, d'autres ont été fermées après des années de fonctionnement et d'autres encore sont localisées à des emplacements très particuliers (à un sommet ou exposées aux effets du vent par exemple), ce qui a pour effet de « brouter » les séries de données.

Les scientifiques ont également développé des méthodes pour évaluer l'évolution des températures alpines avant la période instrumentale (à l'aide de la dendrochronologie, d'études polliniques, etc.). De telles méthodes sont aussi validées, calibrées et complétées au moyen de données issues des approches historiques (comme celle de E. Le Roy-Ladurie en France ou C. Pfister en Suisse). Par exemple, le projet ALP-IMP propose des tendances de température pour l'arc alpin en combinant des méthodes de dendrochronologie et d'homogénéisation des données.

En utilisant ces techniques de reconstruction, les scientifiques ont identifié des périodes chaudes dans les Alpes de 1780 à 1810, de 1890 à 1945 et depuis les années 1970 jusqu'à maintenant. Dans la zone alpine, 1994, 2000, 2002 et 2003 ont été les années les plus chaudes depuis le 16<sup>e</sup> siècle (cette analyse a été conduite jusqu'à l'année 2003 incluse). Les scientifiques estiment que, durant le 20<sup>e</sup> siècle, certains sites de haute altitude ont connu une augmentation des températures moyennes allant jusqu'à 2°C.

De nombreuses analyses des effets de téléconnexion ont été réalisées à l'échelle alpine. Tous les résultats montrent une corrélation positive avec le régime d'Atlantique Est (EA) tout au long de l'année, alors que l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) présente une corrélation positive en hiver uniquement. Cependant, la corrélation avec l'ONA est considérée comme intermittente et des périodes sans corrélation ont également été détectées. Pendant les autres saisons, le régime de Scandinavie (SCAN) semble également affecter les températures alpines.

### Modélisations dans les Alpes

Toujours selon l'AR4 du GIEC : « *The global average surface warming following a doubling of carbon dioxide concentrations is likely to be in the range 2 to 4.5°C with a best estimate of about 3°C, and is very unlikely to be less than 1.5°C. Values substantially higher than 4.5°C can not be excluded but agreement of model with observations is not good for those values. For the next two decades, a warming of about 0.2°C per decade is projected for a range of SRES emission scenarios<sup>2</sup>. The likely range of the SRES scenarios is between 1.1 and 6.4°C (for 2090-2099 relative to 1980-1999) and the best estimate are between 1.8°C and 4.0°C* ».

C'est dans les parties occidentales des Alpes que les augmentations simulées de températures (comparaison des périodes 1971-2000 et 2071-2100) sont maximales (plus de 4.5°C). Le réchauffement simulé diminue progressivement vers le Nord : il s'échelonne entre + 4.9°C pour Nice (France) et + 2.8°C pour Bolzano (Italie). Selon des résultats de Modèles Climatiques Régionaux (RCM), les températures

moyennes alpines pourraient augmenter au maximum de 3°C à 5°C en hiver et de 4°C à 6°C en été, d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, en comparaison avec les températures moyennes du 20<sup>e</sup> siècle<sup>3</sup>.

### Observations dans les Alpes françaises

La température moyenne en France a augmenté de 0.9°C au cours de la période 1901-2000, et la tendance au réchauffement s'est clairement accélérée pendant la dernière décennie. Dans les Alpes françaises aussi, la température moyenne a augmenté de 0.9°C au cours de la période 1901-2000, de même que la moyenne de température minimum journalière. La moyenne de la température maximum journalière dans les Alpes françaises a quant à elle augmenté plus vite : entre 0.9°C et 1.1°C au cours de la même période.

Dans les massifs des Écrins et du Dévoluy, une augmentation significative de la température saisonnière a été observée ces dernières décennies. Entre la période 1960-1980 et la période 1980-2000, la température moyenne saisonnière a augmenté de 0.9°C en été, 0.6°C en automne et 0.7°C en hiver. Depuis les années 1980, les 5 stations météorologiques situées dans le massif des Écrins ont enregistré une augmentation des températures annuelles, et ce quelle que soit l'altitude considérée. Sur la même période de temps, le nombre de jours de gel a diminué de 12 % à 14 % selon la station météorologique considérée.

<sup>2</sup> Pour des explications sur les différents scénarios, voir <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>

<sup>3</sup> M. Beniston, communications personnelles, 2006.

Entre 1965 et 2006, une tendance au réchauffement a également été observée dans les massifs de l'Oisans et du Briançonnais dans les Alpes françaises, avec une série rapprochée d'années chaudes entre 1997 et 2003. La tendance de réchauffement s'échelonne entre + 0.2°C et + 0.4°C par décennie.

## Modélisations dans les Alpes françaises

L'augmentation des moyennes annuelles de températures journalières minimum attendues pour les Alpes françaises d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (modèle ARPEGE de Météo France) est comprise entre 2.3°C et 2.7°C avec le scénario B2 et entre 3°C et 3.5°C pour le scénario A2. Cette augmentation est plus importante que celle attendue à l'échelle de la France métropolitaine. La moyenne annuelle des températures maximales journalières montre une tendance similaire.

Dans le climat simulé (scénario 2\*CO<sub>2</sub>) pour le massif des Écrins, les températures hivernales augmentent plus pour les valeurs minimales que pour les valeurs maximales (jusqu'à + 10°C pour les températures extrêmement basses contre + 3°C pour les températures chaudes).

Pour les autres saisons, le réchauffement est indépendant du caractère minimal ou maximal des températures : + 3°C pour le printemps, + 4°C pour l'été. La conséquence de ce réchauffement s'illustre notamment par une diminution significative du nombre de jours de gel.

Les simulations effectuées pour 3 stations localisées dans les départements des Hautes-Alpes et de l'Isère (utilisation du scénario A2) montrent une augmentation des températures moyennes entre 3.79°C et 3.85°C et une augmentation de l'énergie solaire entre 22 W/m<sup>2</sup> et 26 W/m<sup>2</sup> entre la période « actuelle » (1969-1999) et la période future (2069-2099).

Les modèles développés par Météo France pour évaluer l'évolution du climat et de la couverture neigeuse (SAFRAN/CROCUS) sont également utilisés pour calculer des valeurs passées de température, de précipitation et de couverture neigeuse dans les massifs montagneux. Même si ce genre de donnée ne peut pas être considéré techniquement comme des données d'observations, il s'agit d'une aide précieuse pour compléter les données existantes. Ceci est d'autant plus intéressant que les zones de montagne sont généralement plus difficiles à observer que d'autres espaces. Ce travail est toujours en cours de développement mais certains résultats peuvent déjà être présentés.

Température annuelle en France : écart à la moyenne de 1971-2000 sur la période 1956-2006

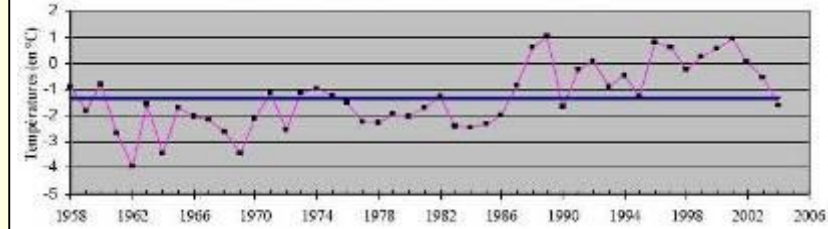


Sources : Météo France 2007

Écart à la moyenne calculé en utilisant un indicateur thermique, la température moyenne de 22 stations métropolitaines en France



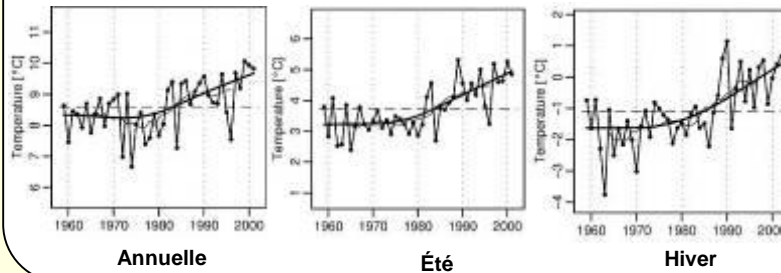
Températures hivernales dans le massif de Chartreuse (1800 m) modélisées pour la période 1958-2006



Sources : Navarre 2007/PGRN

Moyenne de tous les hivers (bleu foncé) et moyenne de chaque hiver (rose)

Températures annuelles, hivernales et estivales dans le massif de Belledune (2400 m) modélisées pour la période 1960-2007

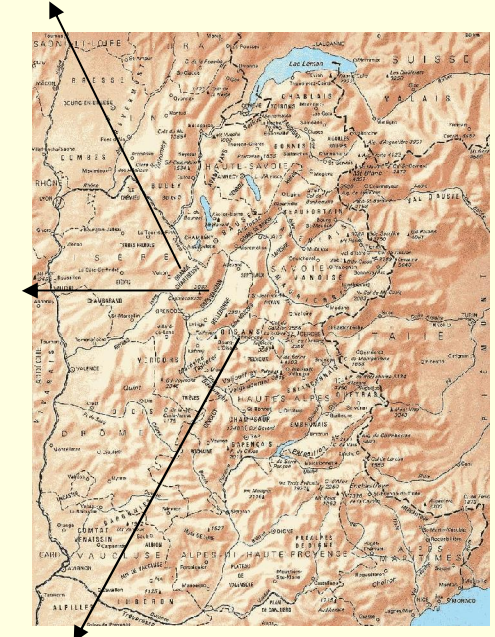


Sources : Météo France 2007

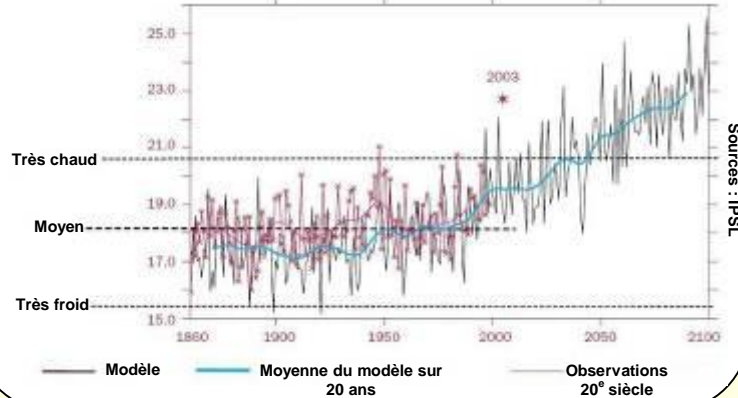
Annuelle

Été

Hiver

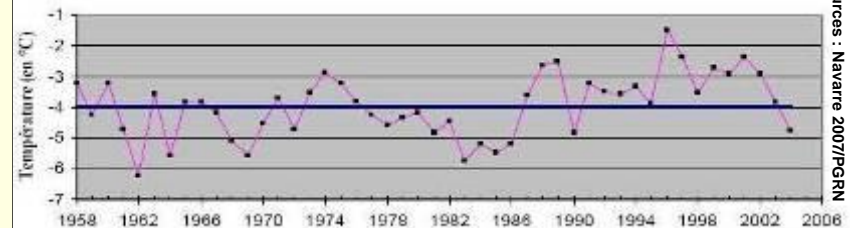


Moyenne des températures estivales en France entre 1860 et 2100 (observations et modélisations)



Sources : IPSL

Températures hivernales dans le massif de l'Oisans (2400 m) modélisées pour la période 1958-2006



Sources : Navarre 2007/PGRN

Moyenne de tous les hivers (bleu foncé) et moyenne de chaque hiver (rose)



## Observations dans d'autres pays alpins

### Alpes allemandes

Dans le sud de l'Allemagne (Länder du Bade-Wurtemberg et de Bavière), les températures moyennes annuelles ont augmenté entre 0.5°C et 1.2°C au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Cette tendance au réchauffement a été plus marquée en hiver et été : la température moyenne mensuelle d'août a augmenté entre 0.7°C et 1.7°C, et la température moyenne mensuelle de décembre a augmenté entre 1.8°C et 2.7°C. Une augmentation de température a également été détectée pour les mois de janvier, février, mars et octobre, bien qu'elle soit moins significative.

### Alpes italiennes

En Italie du Nord, une tendance au réchauffement a été mise en évidence pour toutes les saisons, avec à la fois les températures minimales et maximales qui montrent des tendances positives. Le nombre de jours de gel a également diminué en hiver et au printemps, bien que de manière non significative et aucune tendance n'a été obtenue en automne pour cet indice. L'indice « durée de la vague de chaleur » a également augmenté pendant la période estivale.

Au Piémont et en Vallée d'Aoste la température moyenne s'est élevée d'environ 1°C pendant la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Pendant la période 2003-2006, les anomalies par rapport à la température moyenne à la station météorologique du Lago Valsoera (2 440 m, massif du Gran Paradiso) ont atteint + 1.8°C par rapport à la moyenne de la période 1959-2002.

Pendant l'hiver 2006-2007 (DJF), l'Italie du Nord a connu les températures les plus douces jamais enregistrées depuis 2 siècles. Par exemple, les anomalies hivernales au Moncalieri (Piémont) ont atteint + 2.6°C, en comparaison avec la moyenne 1961-1990 de la station de Dornais.

### Alpes suisses

Les 18 sites d'étude analysés en Suisse montrent un taux de réchauffement qui est significatif et s'échelonne entre 1.8°C/siècle à Neuchâtel (487 m) et 3.5°C/siècle au Säntis (2 500 m). L'augmentation générale des températures minimales hivernales a débuté vers le milieu des années 1960 sur les 18 sites d'études (localisés entre 317 et 2 500 m d'altitude). Après un léger refroidissement au début de la décennie 1980, la tendance est depuis au réchauffement.

En Suisse, au cours des 25 dernières années du 20<sup>e</sup> siècle, le nombre d'années présentant des températures au dessus de la moyenne (1961-1990) a augmenté, avec une augmentation consécutive de l'écart moyen. L'augmentation totale de température est estimée à environ 1.47°C sur la période 1900-2006, avec un réchauffement plus prononcé sur les 40 dernières années (0.4°C par décennie).

Les anomalies lors des vagues de chaleur estivales (comme celle de l'été 2003) sont caractérisées par des écarts importants à la moyenne des températures maximales. Elles demeurent moins importantes que celles observées en hiver à des sites de haute altitude.

Pendant le dernier quart du 20<sup>e</sup> siècle, des anomalies de températures hivernales maximales journalières (référencées ici comme Tmax) ont dépassé + 15°C aux sites du Säntis (2 500 m), du Grand-Saint-Bernard (2 479 m) et de la Jungfrauoch (3 572 m). Les anomalies de plus de 10°C ont été plus fréquentes au cours des 3 dernières décennies. Les hivers dans les Alpes suisses se sont réchauffés plus rapidement que les autres saisons, avec une augmentation consécutive du potentiel d'occurrence de vagues de chaleur hivernales plus fortes et de durée plus importante.

Les anomalies hivernales sont plus importantes en hiver et ceci est encore plus vrai pour les anomalies dépassant le seuil de + 10°C au dessus de la moyenne, dont la fréquence est passée d'une valeur comprise entre 0 et 1 événement par décennie avant 1970 à plus de 20 événements pour la décennie 1990. Aucune autre saison n'a connu une augmentation aussi marquée.

### Modélisations dans d'autres pays alpins

#### Alpes allemandes

Les températures de l'air devraient continuer d'augmenter dans les Länder de Bade-Wurtemberg et de Bavière. L'augmentation de la température moyenne annuelle calculée par les modèles climatiques atteint 1.7°C pour la période 2021-2050 (en comparaison avec la période 1971-2000 et en utilisant le scénario B2). En hiver, l'augmentation est plus importante (environ 2°C) et en été, elle est un plus limitée (1.4°C).

Le nombre de journées estivales ( $T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) et des journées caniculaires ( $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) augmenterait de manière significative en Allemagne du Sud. Le nombre moyen de

journées estivales augmente d'environ 17 jours pour la période future (2021-2050) par rapport à la période actuelle (1971-2000), ainsi que le nombre moyen de journées caniculaires, qui devrait quasiment doubler. La durée maximum de période avec des journées estivales augmente également sur la même période. Consécutivement, l'occurrence de températures très élevées devrait également augmenter.

Comme conséquence du réchauffement global, le nombre de jours froids ( $T_{min} \leq 0^{\circ}\text{C}$ ) et le nombre de jours de gel ( $T_{max} \leq 0^{\circ}\text{C}$ ) devraient diminuer de manière significative. Par exemple, le nombre moyen de jours froids diminuerait d'environ 30 jours pour la période future (2021-2050) par rapport à la période actuelle (1971-2000). Sur la même période, le nombre moyen de jours de gel devrait diminuer de plus de moitié.

#### Alpes suisses

Dans les simulations du climat futur (période 2071-2100, scénario A2), les température estivales dans les Alpes suisses augmentent d'environ 4.6°C (cf. fig. 3).

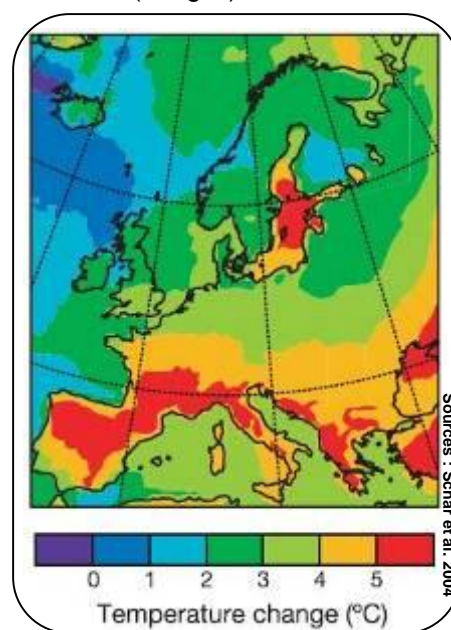
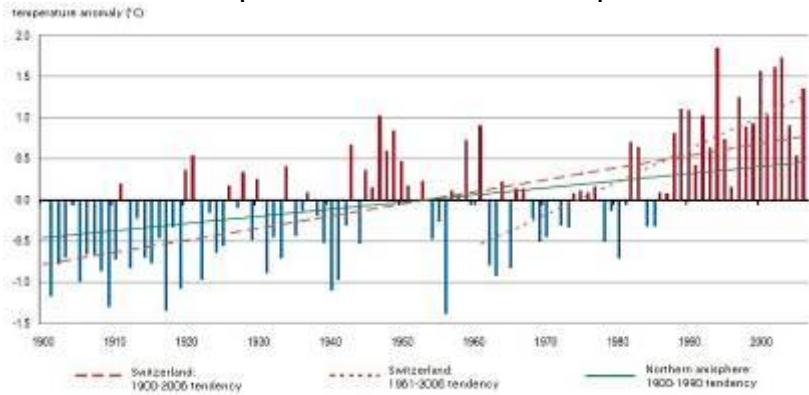


Fig. 3 – Changements de température modélisés pour l'Europe (période 2071–2100 scénario A2)

En terme de température, les conditions climatiques de l'été 2003 peuvent être considérées comme semblables à des conditions estivales moyennes simulées par un RCM pour la période 2071-2100. Pour le Nord de la Suisse, les observations de l'été 2003 se situaient approximativement dans la tranche médiane des points du RCM. Ainsi, les simulations du RCM suggèrent que d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (et selon les hypothèses du scénario considéré), environ un été sur deux pourrait être aussi chaud ou plus chaud (et aussi sec ou plus sec) que celui de 2003.

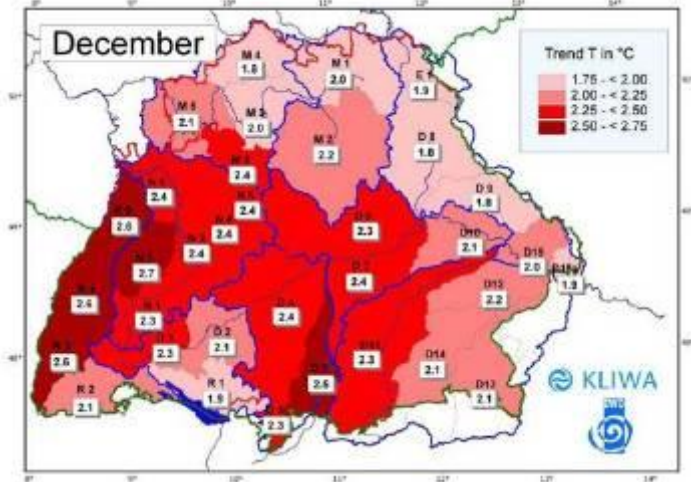
Une étude de 2005 a proposé un scénario de +1°C pour la période 2020-2049 et deux scénarios pour la période 2070-2099 : augmentation de 2.4°C à 2.8°C pour le scénario A2 et de 3°C à 3.6°C pour le scénario B2, avec des taux de réchauffement plus importants en été que pendant les autres saisons. Comme au cours du 20<sup>e</sup> siècle, l'hiver semble être la saison présentant le plus d'anomalies fortes, avec une augmentation simulée de 30 % pour les anomalies dépassant les seuils + 5°C et + 10°C. De plus, les anomalies maximales de Tmax hivernales simulées dépassent les 18.5°C (à comparer avec l'anomalie maximum de 1998 : + 16.2°C) pour un climat hivernal qui devrait se réchauffer en moyenne de 4°C (modèle HIRHAM4) en Suisse.

Anomalies de températures en Suisse au cours de la période 1900-2006

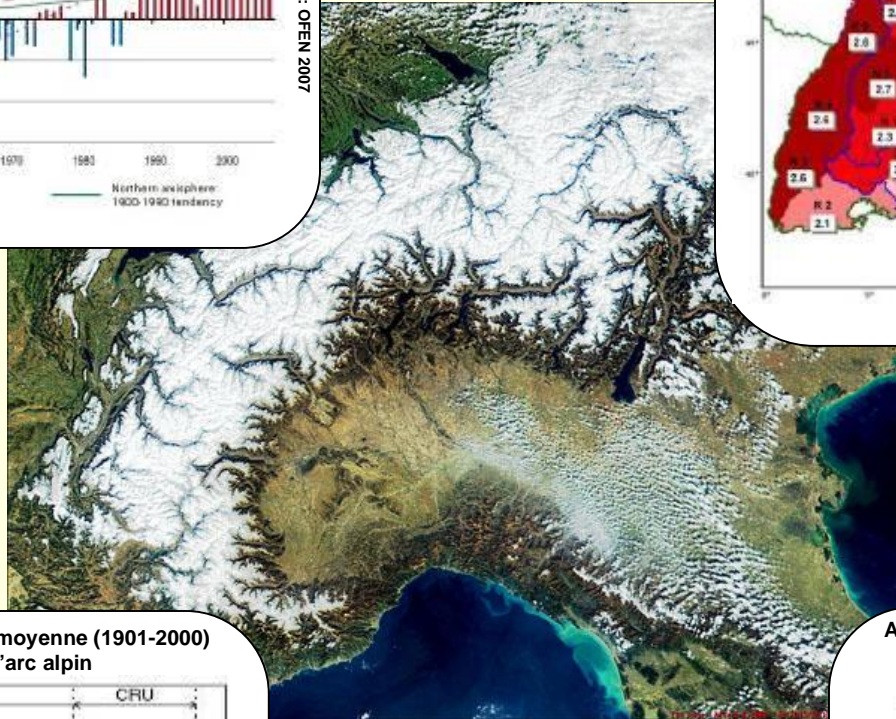


Sources : OFEN 2007

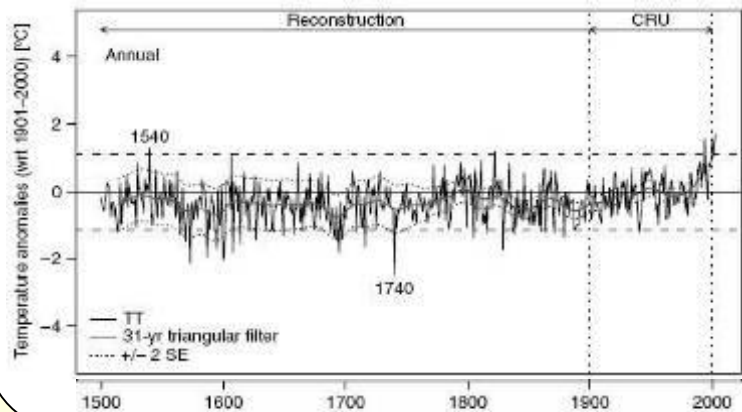
Augmentation de la température en décembre pendant la période 1931 – 2000 en Allemagne du Sud



Sources : KLIWA 2006

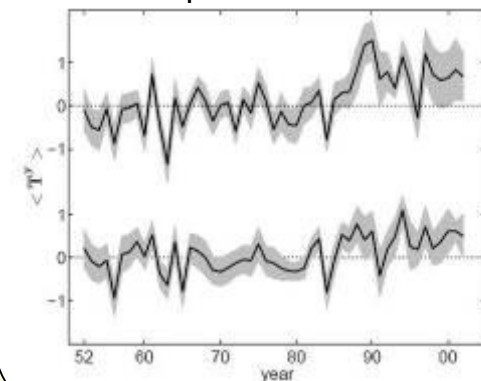


Anomalies de température par rapport à la moyenne (1901-2000) sur la période 1500-2004 dans l'arc alpin



Sources : Casaly et al. 2005

Anomalies de température dans le Piémont et en Vallée d'Aoste au cours de la période 1951-2002



Sources : Ciarrelli et al. 2007

# Précipitation

## Observations dans les Alpes

L'analyse des tendances et de la variabilité des régimes de précipitations dans les Alpes, est beaucoup moins claire que celle des températures. Ceci est dû à différentes raisons :

- Problème bien connu des réseaux de mesure des précipitations dans les zones de montagne : la distribution temporelle et géographique des champs de précipitations est particulièrement influencée par l'orographie ; changements de méthodes de mesures et de localisation des stations d'observations ; faiblesse des algorithmes pour corriger de longues séries de données, etc.
- Existence de différents régimes de grande échelle influençant la fréquence et l'intensité des précipitations au Nord et au Sud des Alpes. Ainsi, des changements dans la circulation atmosphérique et dans les champs de pression atmosphérique (comme résultats du réchauffement global) peuvent influencer de manière différente les franges Nord et Sud des Alpes.
- Ajustement des séries de précipitations aux pas de temps horaires, journaliers, mensuels et même annuels plus contraignant que pour les séries de température car la corrélation spatiale des champs de précipitation est plus faible.

De nombreuses études sur les tendances de précipitations ont été conduites à l'échelle des Alpes et proposent une évolution générale assez hétérogène. Des résultats récents suggèrent que, lorsque l'on analyse les précipitations, la significativité des tendances est fortement dépendante de la fenêtre temporelle considérée. Malgré le manque de significativité des tendances à l'échelle alpine et le manque de direction générale de l'évolution des précipitations, des fluctuations locales des régimes de précipitations ont été observées.

Des tendances faibles ou non significatives ont été détectées pour le siècle dernier à l'échelle méditerranéenne, à l'échelle alpine et à partir d'analyse de séries temporelles particulières. L'analyse de corrélation révèle une corrélation faible et fortement intermittente avec l'indice ONA au nord et des corrélations plus convaincantes au sud de la chaîne alpine. Une diminution des précipitations automnales et hivernales au sud de l'arc alpin a également été identifiée.

La variabilité interannuelle et intersaisonnière des précipitations est très importante. De plus, les séries temporelles de précipitation alpines n'indiquent pas de tendances significatives. L'augmentation attendue des précipitations comme conséquence du réchauffement de l'atmosphère n'est pas retrouvée à l'échelle alpine par les reconstructions climatiques pour la période 1500-2003. Une approche saisonnière a permis aux chercheurs d'identifier des tendances hivernales et estivales singulières : des hivers secs sont survenus pendant la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle et des hivers particulièrement secs ont été observés entre 1990 et 1994.

L'analyse des tendances interannuelles de précipitations estivales indiquent trois périodes sèches en particulier : aux alentours de 1540, après 1770 et après 1860. Une diminution des précipitations estivales a également été détectée après 1970.

Des étés très humides sont survenus de 1550 à 1700. L'été de l'année 1540 a été le plus sec dans les Alpes depuis 1500 (anomalie de - 164 mm par rapport à la moyenne estivale des sommes de précipitations sur le 20<sup>e</sup> siècle qui est de 352 mm); l'été 2003 présente des caractéristiques similaires. L'été de l'année 1663 a, quant à lui, été le plus humide sur la même période avec une anomalie de + 148 mm par rapport à la moyenne.

### Modélisations pour les Alpes

A l'échelle globale, les modèles climatiques calculent généralement des projections futures avec une diminution des précipitations estivales et une augmentation des précipitations hivernales pour les régions de moyenne latitude et des changements moindres pour les régions de haute latitude. Malgré l'intensification du cycle hydrologique global prédite par les OAGCM (*Ocean-atmosphere coupled general circulation model*), les changements de précipitations demeurent peu convaincants.

La faible résolution spatiale des OAGCM exclut la possibilité de réaliser une simulation réaliste de la circulation générale et, par là même, de l'occurrence des précipitations extrêmes. De plus, il n'y a pas d'indication dans le sens d'un décalage des précipitations de l'été vers l'automne.

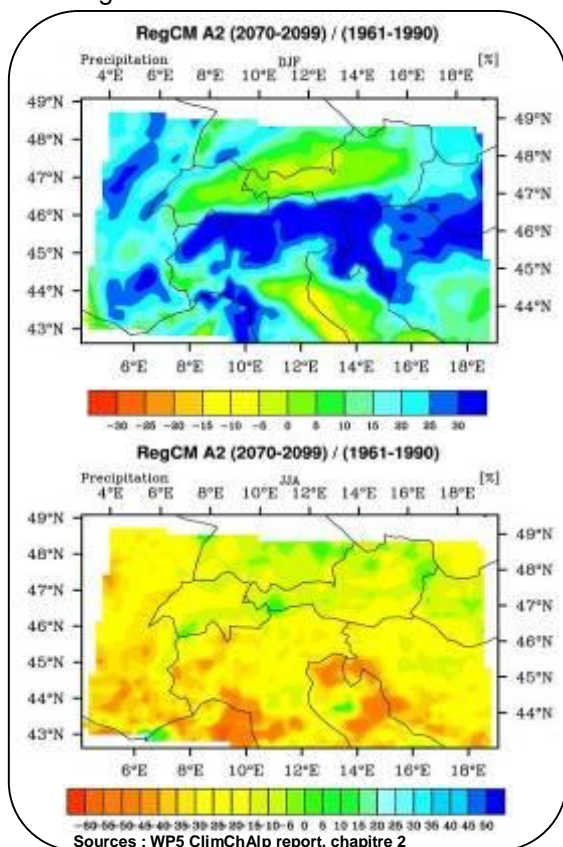
Les projections de changement des régimes de précipitation pour les zones de montagnes sont fragiles dans la plupart des Modèles de Circulation Globale (MCG), notamment à cause de la faible résolution de la topographie montagneuse. De fait, l'effet de la topographie sur les précipitations n'est pas représenté de manière adéquate.

Il a également été reconnu qu'il existe des effets de surimposition par des modes naturels de variabilité climatique à grande échelle comme El Nino/ENSO, l'ONA... ...qui perturbent les régimes de précipitation à des échelles temporelles allant de la saison à la décennie. De tels mécanismes ne sont pas bien prédits par les modèles.

Comme cela vient d'être rappelé, les modèles climatiques de grande échelle ne sont pas satisfaisant pour des projections climatiques à une échelle régionale, comme les Alpes. C'est pourquoi certains partenaires du WP5<sup>4</sup> de ClimChAlp ont évalué la validité des RCM (avec une résolution spatiale horizontale comprise entre 10 et 20 kilomètres) et des OAGCM (avec une résolution spatiale horizontale d'environ 200 kilomètres) pour la zone alpine. Le but de ce travail était de préparer des scénarios régionaux de changement climatique avec une bonne résolution qui pourraient être utilisés pour des études d'impacts à l'échelle des Alpes.

<sup>4</sup> Pour plus de détails, voir le chapitre 2 du Climate Change Module, disponible sur le site [www.climchalp.org](http://www.climchalp.org)

D'une manière générale, les résultats des RCM utilisés dans le WP5 montrent une augmentation des précipitations moyennes hivernales et une diminution des précipitations moyennes estivales (cf. fig. 5). La plupart des modèles convergent également dans le sens d'une augmentation des précipitations intenses en hiver. Pour ce qui est de la période estivale, les résultats des modèles sont associés à trop d'incertitudes pour proposer une image claire.



**Fig. 5 – Changements simulés (en %) des précipitations moyennes hivernales (haut) et des précipitations moyennes estivales (bas) entre la période 1960-1991 et la période 2071-2100 (modèle RegCM, scénario A2)**

De plus, il est ressorti de cette analyse qu'il n'y avait pas un RCM qui prévalait sur un autre pour la modélisation du climat alpin. Les RCM analysés (notamment HIRHAM (danois), RegCM (italien), CLM (allemand) et REMO (allemand)) reproduisent de manière satisfaisante les températures moyennes mensuelles et les précipitations moyennes journalières. Par contre, ils surestiment largement les cumuls moyens de

précipitations saisonnières. Il y a une demande grandissante de modélisation pour les valeurs climatiques extrêmes et plus particulièrement pour les valeurs extrêmes de précipitation. En effet, des changements des valeurs extrêmes sont à même d'avoir plus d'impacts que des changements des valeurs moyennes, et ceci est d'autant plus vrai dans une perspective d'évolution des risques naturels. Les travaux du WP5 ont notamment montré que l'évaluation des changements de fréquence et d'intensité des extrêmes climatiques reste un problème non résolu à l'heure actuelle. Enfin, il a été montré qu'il est encore difficile d'utiliser les données de sorties de modèles climatiques régionaux comme données d'entrées pour des modèles hydrologiques. Malgré l'utilisation de techniques de corrections des données, les biais sont encore trop importants.

Une publication récente a par ailleurs comparé les résultats de 3 RCM et de 6 Méthodes d'Extrapolation Statistique (MES) pour l'Europe<sup>5</sup>. Les simulations des RCM en terme de changement des régimes de précipitation européens montrent des tendances saisonnières distinctes : en hiver, les régions au Nord du 45°N subissent une augmentation des précipitations moyennes alors que les régions méditerranéennes subissent plutôt une diminution des précipitations moyennes. Les résultats sont très similaires entre les 3 RCM. La plupart des MES produit une augmentation des précipitations moyennes similaire à celle des RCM. En été, les RCM simulent une diminution importante des précipitations moyennes pour l'ensemble de la chaîne alpine. Cette baisse est surtout due à une réduction substantielle de la fréquence des journées humides.

<sup>5</sup> Les RCM et MES utilisés dans cette étude sont détaillés dans la publication

Le nombre limité de journées humides a pour conséquence une augmentation importante (de 50 % à 100 %) de la durée maximale des épisodes de sécheresse. En comparaison avec l'hiver, les différences entre les RCM et les MES, mais aussi entre les MES, sont plus importantes. D'une manière générale, les différences entre RCM et MES, ainsi que les biais substantiels des RCM en été illustrent les incertitudes toujours importantes qui sont associées avec les résultats des scénarios pour la saison estivale.

En automne, la région considérée subit une diminution des précipitations moyennes comme conséquence de la réduction importante de la fréquence des journées humides, accompagnée par une augmentation modérée de l'intensité des précipitations. Encore une fois, les résultats sont assez similaires entre les 3 RCM.

Cette analyse suggère que les incertitudes associées aux techniques d'extrapolation statistique sont relativement réduites en hiver et en automne, mais qu'elles sont à l'inverse très significatives en été.

### Observations dans les Alpes françaises

Pour les valeurs moyennes de précipitation, aucune tendance d'évolution significative n'a été détectée à l'échelle de la France métropolitaine. Ceci s'explique, soit par l'absence d'évolution sur des séries bien contraintes soit par des évolutions trop faibles au regard des incertitudes sur les séries concernées. Pour les Alpes françaises, l'image n'est pas plus claire.

Dans les Alpes du Sud, la variabilité des précipitations entre 1950 et 2000 est caractérisée par une très forte hétérogénéité.

Aucune tendance générale n'est réellement détectée, même si de légères tendances peuvent être notées pour des caractéristiques particulières et quelques stations météorologiques.

Par contre, certaines évolutions locales ou régionales ont été constatées concernant des indices de précipitations extrêmes ou intenses (les seuils diffèrent d'une étude à l'autre). Les stations météorologiques des Alpes du Nord reçoivent généralement plus de précipitations intenses que celles des Alpes du Sud pour toutes les saisons, sauf l'été. De ce fait, l'augmentation des indices de précipitations intenses (observée par exemple en Savoie sur la période 1958-2001) y est plus significative, surtout en hiver.

A Chamonix, les moyennes annuelles des précipitations solides et les valeurs extrêmes de précipitations solides ne montrent pas de tendances entre 1959 et 2004. Des variations interannuelles très fortes et quelques cycles annuels peuvent cependant être détectés. Il est également intéressant de noter que les chutes de neige journalières les plus importantes ont été observées pendant la décennie 1990, qui est en même temps caractérisée par un des enneigements moyen les plus réduits.

Dans le massif des Écrins, il y a eu une augmentation significative des précipitations estivales d'intensité égale ou supérieure à 30 mm par jour sur la période 1986-2000. Dans le même temps, il n'y a eu aucune variation significative des moyennes annuelles de précipitation depuis 1980 pour toutes les stations météorologiques des massifs des Écrins et du Dévoluy.



Dans les Alpes maritimes, de nombreux indices montrent une diminution significative des précipitations moyennes au printemps et en été, alors qu'ils montrent des tendances très faiblement significatives pendant l'hiver pour la période 1958-2001. En automne, seules quelques stations enregistrent des augmentations significatives.

Au cours de la même période dans le massif du Queyras (Hautes-Alpes), des signaux d'augmentation significative de certains indices de précipitations extrêmes sont détectés pour le printemps et l'hiver. Le cumul total des précipitations montre également une légère augmentation au printemps et en automne. Le nombre maximal de journées sèches augmente également au printemps et diminue en automne.

### Modélisations pour les Alpes françaises

L'évolution relative des cumuls annuels de précipitation, simulée pour 2100 dans les Alpes françaises avec le modèle ARPEGE, varie entre - 0.15 % et + 0.05 % pour le scénario B2 et entre - 0.6 % et - 0.2 % pour le scénario A2. A l'échelle du bassin du Rhône (résultats d'ARPEGE pour la période 2054-2064 avec le scénario 2\*CO<sub>2</sub>), le ratio de précipitation solide (neige) par rapport au total de précipitations devrait diminuer significativement (- 21 %), et ce plus particulièrement pour les bassins de faible et moyenne altitude.

Le climat simulé par ARPEGE (scénario 2\*CO<sub>2</sub>) pour le massif des Écrins montre une augmentation de l'intensité des précipitations en automne et en hiver, et ce plus spécialement pour les précipitations extrêmes (le nombre futur d'événements dépassant 45 mm/j devrait être le nombre actuel d'événements dépassant 30

mm/j), alors que cela ne devrait pas changer de manière significative au printemps. En été, l'évolution est bien plus compliquée : pour les valeurs journalières  $\leq 50$  mm/jour, la fréquence devrait diminuer alors que pour les valeurs au-dessus de ce seuil, la fréquence devrait augmenter. Cependant, cette situation reste fortement hypothétique.

Les simulations du modèle ARPEGE/IFS pour 3 stations dans les départements des Hautes-Alpes et de l'Isère (comparaison entre 1970-1999 et 2070-2099 en utilisant le scénario A2) indiquent une diminution de l'humidité relative (de - 4.38 % à - 2.35 %), une évolution contrastée des précipitations liquides (de - 0.05 mm/jour à + 0.47 mm/jour) et une diminution des précipitations solides (de - 0.64 mm/jour à - 0.19 mm/jour).

### Observations dans d'autres pays alpins

#### Alpes allemandes

Pour les précipitations moyennes en Allemagne du Sud, il y a eu une diminution significative des valeurs estivales depuis les années 1930, et ce plus particulièrement dans le Nord Württemberg et en Basse Franconie. Dans l'Est de la Bavière, cette diminution montre un faible degré de significativité et dans le sud de la Bavière, une légère augmentation a été détectée. L'augmentation des précipitations hivernales est significative pour la plupart des stations météorologiques étudiées, à l'exception de celles localisées sur les contreforts alpins où la légère augmentation n'est pas statistiquement significative.

Pour les précipitations extrêmes (percentile 90) et intenses (souvent définies par le dépassement du seuil 30 mm/j), l'image est contrastée. D'un côté, les indices de précipitations extrêmes montrent une augmentation hivernale qui varie entre 30 % et 35 % et qui est significative à la fois pour l'Allemagne sur la période 1958-2001 et l'Allemagne du Sud sur la période 1930-2000, surtout dans les régions de la Forêt Noire, dans le Nord-est du Bade-Wurtemberg et dans le Nord de la Bavière. Dans le même temps, les indices de précipitations intenses montrent eux une diminution significative à l'échelle de l'Allemagne, mais aucune tendance n'est détectée pour l'Allemagne du Sud.

### **Alpes italiennes**

En Italie, il y a une distinction claire sur la période 1951-1995 entre les catégories « extrêmes » à « torrentielles » (plus de 32 mm/jour à plus de 128 mm/jour) d'une part, qui montrent une tendance à l'augmentation, et les autres catégories (de 0 mm/jour à 32 mm/jour) qui montrent une diminution significative. Cette image nationale est nuancée par une étude plus régionale proposée dans le cadre du projet STARDEX ; dans le Nord de l'Italie, les indices liés aux précipitations extrêmes montrent des tendances négatives en hiver et au printemps alors qu'ils montrent des tendances positives en été sur la période 1958-2001. Le nombre maximal de journées sèches consécutives a augmenté seulement en hiver, aucun changement n'a été observé pour les autres saisons.

A l'échelle des Alpes italiennes de l'Ouest, une analyse détaillée, réalisée sur la période 1952-2002, n'indique pas de tendance significative à la fois pour l'intensité des précipitations et la durée des périodes de sécheresse. Une étude

similaire, conduite sur la partie Est des Alpes italiennes met également en avant l'absence de tendance significative pour les précipitations. Ces contradictions apparentes illustrent la difficulté qu'il y a à détecter des tendances significatives sur les précipitations et l'influence des choix méthodologiques effectués (séries de données, seuils, fenêtres temporelles, aires géographiques...).

### **Alpes suisses**

A l'échelle des Alpes suisses et pour la période 1901-1994, l'augmentation des précipitations moyennes hivernales varie entre 15 % et 20 % et est statistiquement significative ; en revanche aucune tendance significative n'a été trouvée pour les autres saisons. La comparaison des moyennes mensuelles de précipitation entre les périodes 1961-1990 et 1931-1960 indique une augmentation de 20 % pour les mois de décembre, mars et avril.

En revanche, il y a une diminution de 10 % pour les mois de juillet et septembre. L'augmentation des précipitations hivernales semble être maximale pour l'Ouest de la Suisse (20 %), de même que pour les précipitations moyennes annuelles, pour lesquelles une augmentation générale a été détectée entre 1977 et 1998.

Des analyses régionales des parties alpines de la Suisse ne proposent pas toujours des tendances significatives. Par exemple, l'analyse de 8 stations météorologiques suisses localisées dans 4 sous régions (Jura, Plateau, Alpes, Alpes du Sud) n'a permis de détecter des variations significatives que sur le site de haute altitude du Säntis (2 500 m), avec une augmentation de 3.3 mm/jour (avec la période 1961-1990 comme référence).

D'autres études régionales concernant le Tessin et les Préalpes suisses font également état de l'absence de tendance significative concernant les précipitations.

Cependant, les indices liés aux précipitations intenses indiquent généralement une augmentation significative en hiver et à l'automne, alors qu'ils indiquent des tendances positives faibles pour l'été et le printemps sur la période 1958-2001. Aucun changement significatif n'a été détecté pour le nombre maximum de journées sèches consécutives.

En Suisse, sur la période 1975-1997, la fréquence des précipitations intenses (considérant le seuil suivant : plus de 70 mm/jour sur une surface minimale de 500 km<sup>2</sup>) a doublé par rapport à la valeur moyenne de 1901-1974, pour atteindre 3 événements par an en 1997. Lorsque l'on choisit un autre seuil pour les précipitations intenses (> 50 mm/jour), une augmentation est également détectée depuis 1973. Ces résultats sont nuancés par une autre étude qui stipule que pour les événements extrêmes, le nombre de stations avec des tendances significatives est bas pour l'ensemble des saisons et que les résultats doivent donc être considérés comme peu concluants. Des tendances générales peuvent être esquissées, mais elles sont peu significatives d'un point de vue statistique.

## Modélisations pour les autres pays alpins

### Alpes allemandes

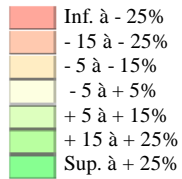
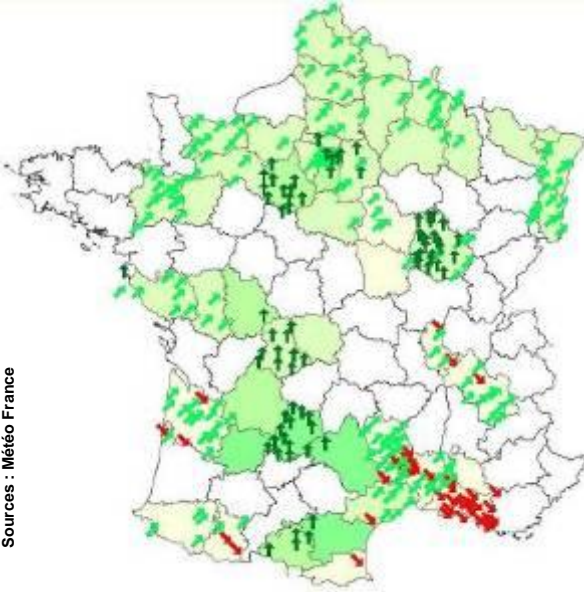
L'augmentation simulée des valeurs moyennes annuelles de précipitations pour l'Allemagne du Sud est d'approximativement 8 % pour la période 2021-2050, avec une fourchette de résultat comprise entre 4 % et 17 %.

Les précipitations devraient diminuer de 4 % en été en Allemagne du Sud ; dans le même temps, les précipitations hivernales devraient augmenter de manière significative. En fonction de la région considérée, l'augmentation peut varier et atteindre jusqu'à 35 %. Par contre, les modélisations climatiques régionales disponibles ne permettent pas de proposer des données quantitatives pour le futur développement des précipitations convectives de courte durée (orages) qui sont importantes pour le ruissellement urbain et les crues dans des bassins versants de petite superficie.

### Alpes suisses

Malgré les incertitudes liées aux simulations climatiques régionales pour les projections de précipitations dans des terrains avec une topographie complexe, une analyse basée sur 4 projections climatiques régionales pour un « climat réchauffé » en 2100 suggère que les précipitations moyennes et extrêmes devraient connaître un décalage saisonnier. Il y aurait plus d'événements de précipitations intenses (définies ici comme le 99<sup>ième</sup> quantile des valeurs journalières) au printemps et à l'automne et moins pendant l'été. Le 99<sup>ième</sup> quantile correspond à un peu plus de 60 mm/jour et l'augmentation du nombre d'événements de précipitations extrêmes (environ 30 % d'ici à l'horizon 2100) est en accord avec des résultats précédents d'autres auteurs.

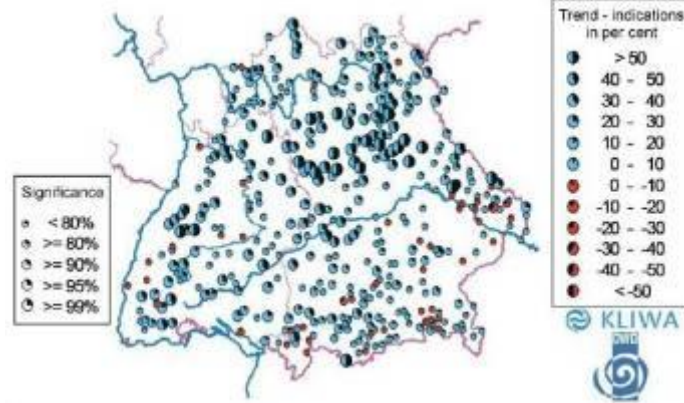
### Évolution des précipitations annuelles au cours du 20<sup>e</sup> siècle en France (% par siècle)



Les flèches verticales représentent un tendance significative ; les obliques représentent une tendance non-significative. Les flèches pointant vers le haut indiquent une augmentation, celles vers le bas, une diminution

Sources : Météo France

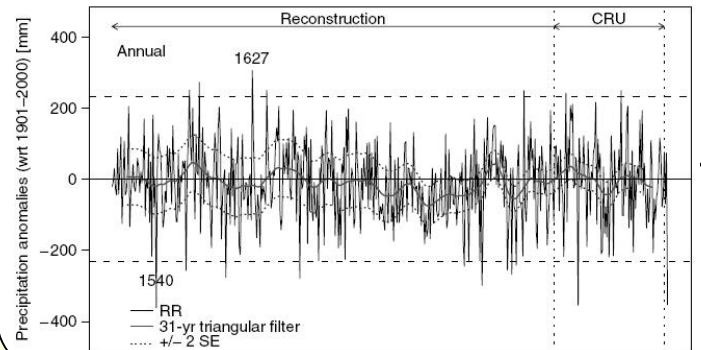
### Augmentation des précipitations intenses hivernales journalières en Bavière et Bade-Wurtemberg pendant la période 1931-2000



Sources : KLIWA 2006

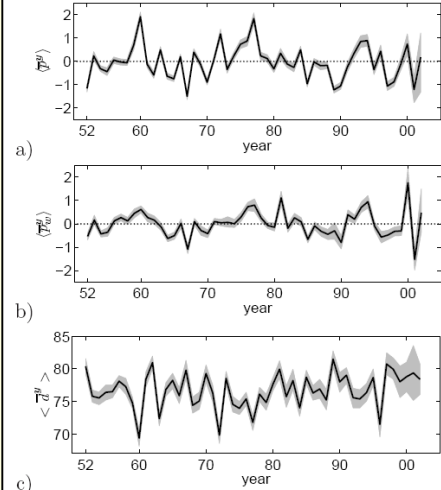


### Anomalies annuelles moyennes des précipitations dans l'arc alpin (période 1500-2004) avec la période 1901-2000 comme référence



Sources : Casty et al. 2005

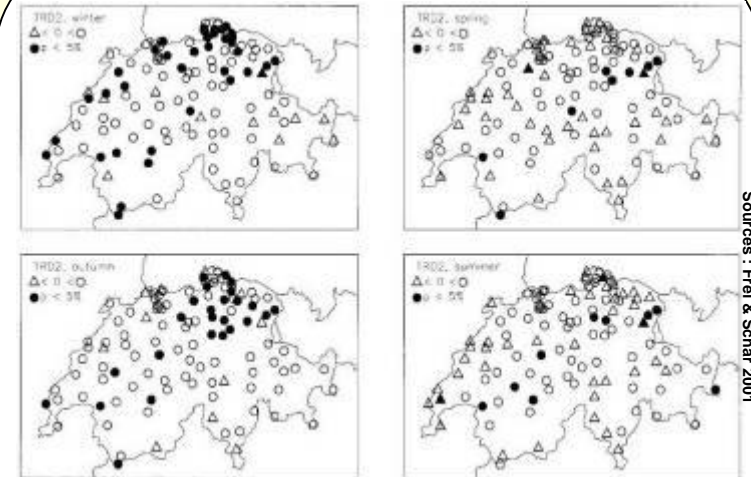
### Statistiques de précipitations (regroupées et standardisées) pour l'Italie



Sources : Ciarrelli et al. 2007

a) Moyennes des précipitations ;  
b) Intensité des précipitations ;  
c) Pourcentage de jours secs par an.  
Les bandes grises indiquent 95% de confiance

### Tendance pour les précipitations intenses en Suisse (1901-1994)



Sources : Frei & Schär 2001

Approche saisonnière montrant les résultats des tendances pour la fréquence des précipitations journalières intenses (événement survenant une fois tous les 30 jours au cours de la période climatique). Les symboles représentent la direction de la tendance estimée (cercle : augmentation, triangle : diminution) et sa significativité statistique (symbole plein :  $p < 5\%$ ). Les tendances ont été estimées et testées à partir séries de données saisonnières de la période 1901-1994 en utilisant une régression linéaire logistique

## Glaciers alpins

### Observations dans les Alpes

Les glaciers de montagne sont sensibles non seulement aux températures mais également aux changements de précipitations, de radiations solaires, au ratio de précipitations solides/liquides, etc. Pendant les dernières décennies, la longueur et l'amplitude des périodes d'accumulation et d'ablation ont fortement varié. Le bilan de masse glaciaire et la longueur de la langue glaciaire sont des indicateurs classiques pour évaluer l'évolution des glaciers. En effet, malgré la connexion complexe entre le climat et la réaction des glaciers, les glaciers sont considérés comme de bons indicateurs du changement climatique : leur surface, leur élévation, leur épaisseur, leur volume et leur longueur sont déterminés par la différence entre l'accumulation et l'ablation qui sont fortement liées au climat.

Pendant l'été, la glace alpine est proche de son point de fusion, ainsi un changement de température, même sur une courte période peut entraîner une évolution marquée. Par exemple, au cours de l'été 2003, la vague de chaleur a causé des records de fonte des glaciers avec une perte de masse moyenne correspondante d'environ - 2.5 m d'équivalent eau (e.e). Cette valeur est huit fois plus importante que la valeur moyenne sur la période 1960-2000.

Les tendances qui ressortent des longues séries temporelles disponibles pour les paramètres « longueur cumulée » et « changement de volume » des glaciers représentent des preuves convaincantes d'un changement climatique rapide à l'échelle globale.

Les glaciers de montagne ont décliné en moyenne dans les deux hémisphères et la perte de masse séculaire est considérée comme un phénomène mondial (cf. fig. 7) depuis 1850.

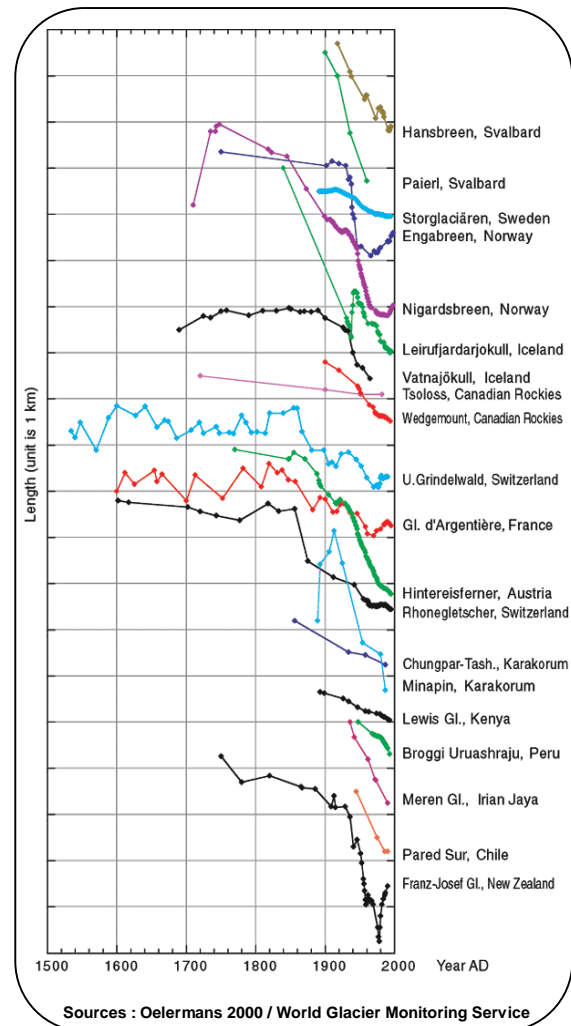


Fig. 7 – Fluctuations de longueur de 20 glaciers dans le Monde

Les glaciers des Alpes européennes ont perdu environ 30 % à 40 % de leur surface englacée et à peu près la moitié de leur volume total (soit - 0.5 % par an) entre la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG, à partir du milieu du 19<sup>e</sup> siècle) et 1975. Entre 1975 et 2000, environ 25 % du volume restant a probablement disparu (soit - 1 % par an). Cette tendance s'est accélérée au début du 21<sup>e</sup> siècle puisque ce sont 10 % à 15 % supplémentaires qui ont disparu (soit - 2 % à - 3 % par an) entre 2000 et 2005.

Même si la plupart des glaciers sont en phase de retrait généralisée depuis la fin du PAG, il existe des disparités dans le temps et l'espace par rapport à cette tendance générale. Malgré l'apparente homogénéité du signal à l'échelle séculaire, des contrastes régionaux apparaissent sur de courtes périodes de temps (de quelques années à une décennie). Ceci est dû à une forte variabilité régionale. Par exemple, une période de crue glaciaire a été observée dans les Alpes européennes pendant la décennie 1970-1980 ; cette période d'avancée glaciaire a également été observée dans d'autres régions à travers le monde, comme le Pamir-Alai, le Tien-Shan, etc. La taille du glacier et sa répartition altitudinale sont également des facteurs critiques lorsque l'on analyse sa sensibilité aux changements climatiques : plus le volume du glacier est réduit, plus sa sensibilité au réchauffement climatique est importante. A des altitudes supérieures à 4000 m, les surfaces englacées sont généralement très froides et l'augmentation des températures atmosphériques induit pour l'instant un réchauffement de la glace plutôt qu'un changement de masse.

La tendance au retrait mentionnée précédemment se retrouve dans l'analyse de bilans de masse de certains glaciers sur la période 1965-2000. Dans les années 1960 et 1970, les variations annuelles des bilans de masse glaciaire se compensaient, mais depuis le milieu des années 1980, une période de perte de volume continue et accélérée a été observée (cf. fig. 8). Cette perte est estimée à environ 0.5 à 1 mètre e.e par an, avec une perte exceptionnelle au cours de l'été 2003 (2.5 mètres e.e.).

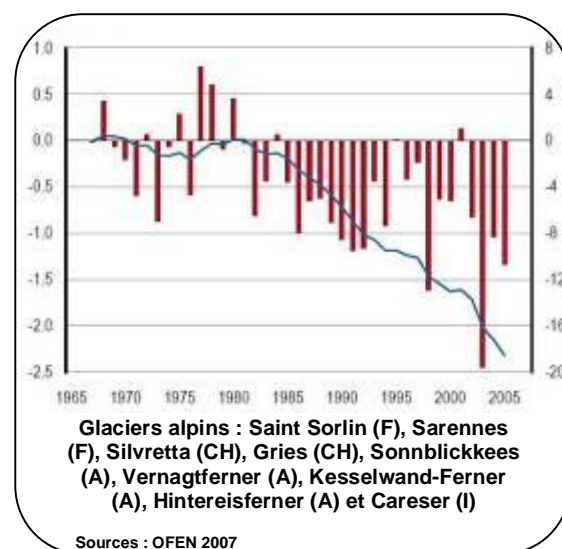


Fig. 8 – Bilan de masse annuel (axe de gauche) et cumulée (axe de droite) de neuf glaciers alpins



## Observations dans les Alpes françaises

L'avance marquée des glaciers alpins pendant le PAG est certainement la conséquence de conditions climatiques plus favorables aux glaciers. Pendant cette période historique, le climat était plus froid et humide. Ainsi, le retrait actuel et la diminution de volume des glaciers alpins sont partiellement dus à des conditions climatiques qui se rapprochent des valeurs moyennes de l'Holocène. Cependant, il est très probable que le réchauffement global récent ait accentué cette tendance existante de retrait glaciaire. Par exemple, en 2001, le front de la Mer de Glace était approximativement 2.2 kilomètres plus haut que son extension maximale au cours du PAG (cf. fig. 9) et en 2006, cette valeur atteignait 2.3 kilomètres.

L'analyse des bilans de masse glaciaires français révèle quatre périodes principales : (i) entre le début du 20<sup>e</sup> siècle et 1941, les glaciers alpins français ont perdu un peu de masse (ii) entre 1942 et 1953, les glaciers ont subi des déficits importants à cause de précipitations hivernales réduites et d'importantes ablations estivales (iii) entre 1954 et 1981, les bilans de masse sont généralement positifs et ont induit une période marquée de crue glaciaire (plusieurs centaines de mètres pour le front de la Mer de Glace, le glacier d'Argentières et des Bossons dans le massif du Mont Blanc) et depuis (iiii) 1982, les bilans de masse sont en déficit à cause d'un niveau élevé d'ablation estivale (de 1.9 mètres à 2.8 mètres à 2 800 m d'altitude). Ceci est dû à une augmentation importante du bilan énergétique.

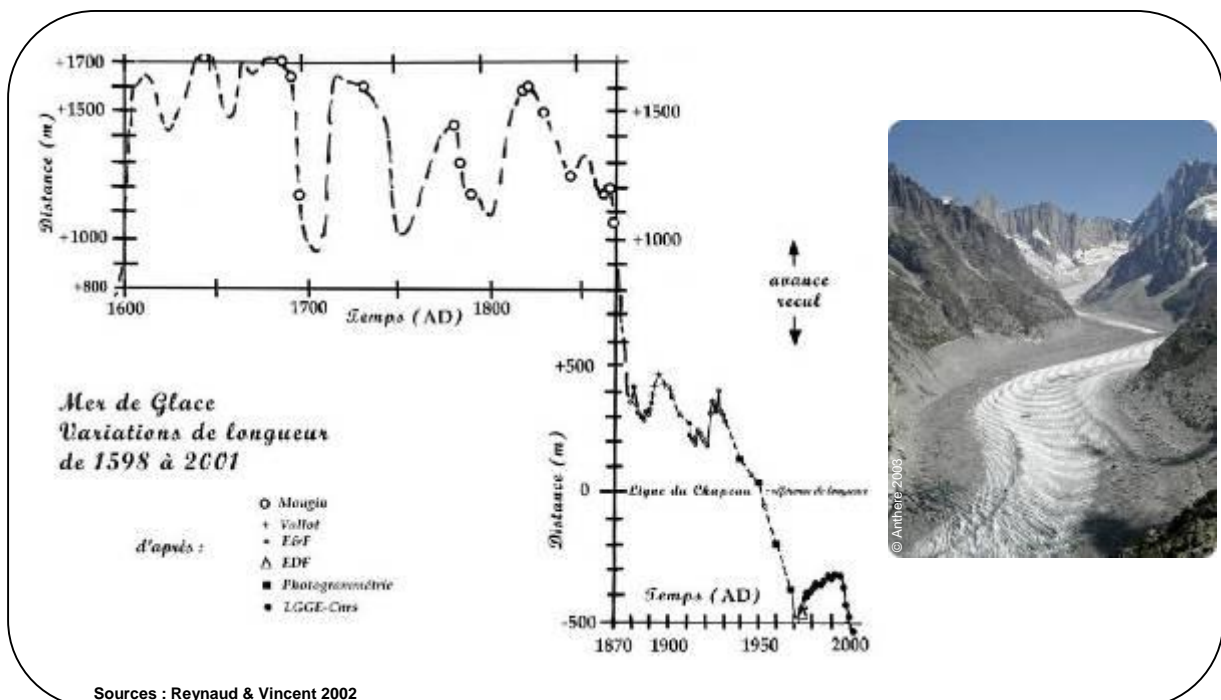


Fig. 9 – Fluctuations de la Mer de Glace collectées par Mougin (1598-1870) et complétées par des mesures récentes

Concernant les pics montagneux de haute altitude, une étude récente menée sur les parties sommitales englacées du Mont Blanc (4 808 m) et du Dôme du Goûter (4 300 m) montrent que, contrairement à ce qui a été observé dans les langues glaciaires du massif du Mont Blanc, il n'y a pas eu de changement majeurs d'épaisseur détectés sur la période 1905-2005 pour la majeure partie de la zone d'étude (cf. fig. 10).

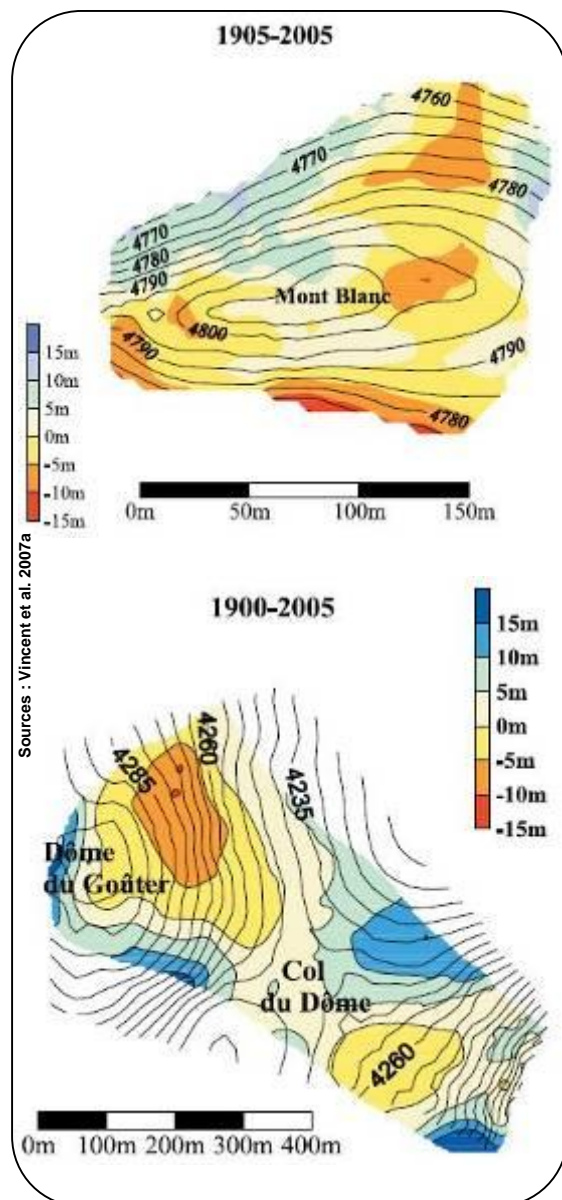


Fig. 10 – Changements d'épaisseur dans les parties sommitales englacées du Mont Blanc et du Dôme du Goûter entre 1905 et 2005

Par contre, les températures de la glace au Col du Dôme du Goûter (4 250 m) ont clairement augmenté de 1°C à 2°C (jusqu'à 80 mètres de profondeur) entre 1994 et 2005 (cf. fig 10'). Si cette évolution se poursuivait, elle pourrait transformer des glaciers « froids » en glaciers « tempérés », avec des conséquences pour la stabilité à long terme des glaciers suspendus (voir le chapitre « risque glaciaire »).

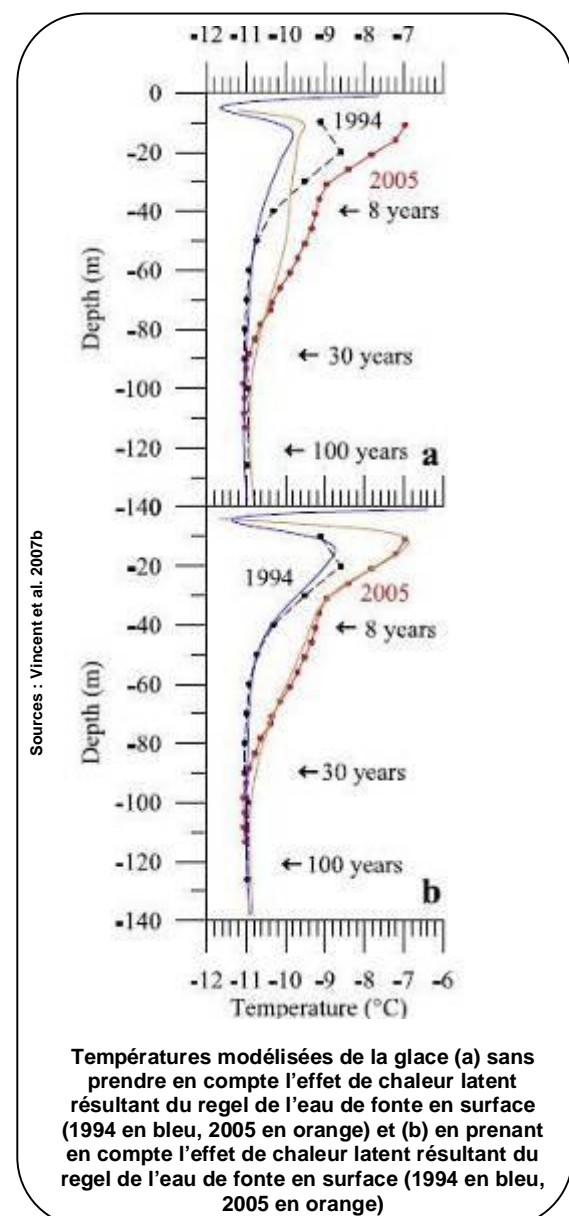


Fig. 10' – Températures de la glace mesurées dans des forages au Col du Dôme du Goûter en 1994 et 2005



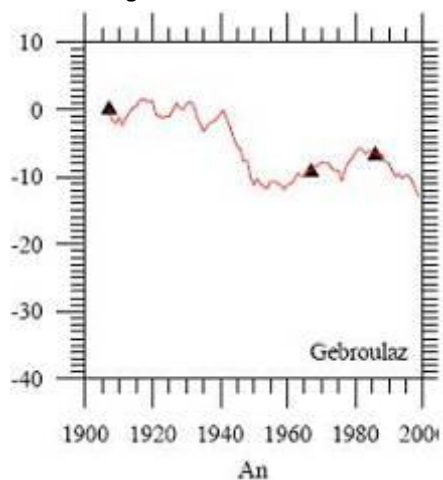
Fig. 11 – Cumul de bilans de masse dans les Alpes françaises

Glacier de Saint Sorlin



© LGGE

Cumul des bilans de masse (e.e)  
(Variation d'épaisseur moyenne) du glacier de Gebroulaz



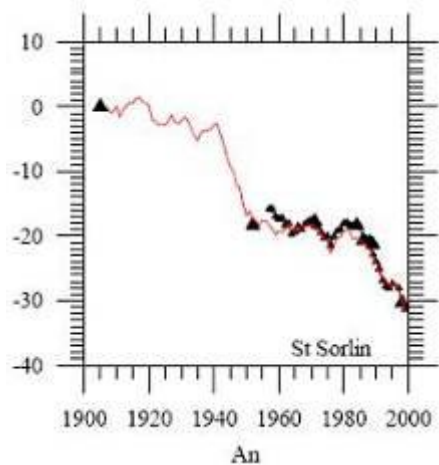
Sources : ONERC / LGGE

Glacier d'Argentières



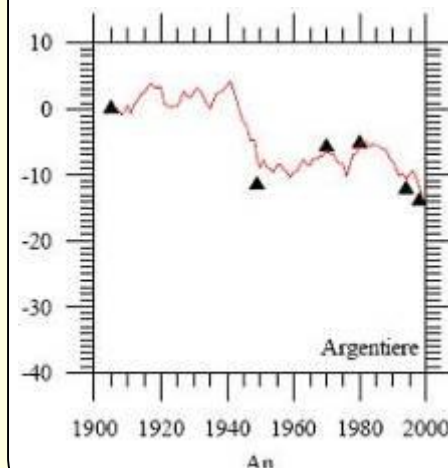
© JM Lasiea

Cumul des bilans de masse (e.e)  
(Variation d'épaisseur moyenne) du glacier de Saint Sorlin

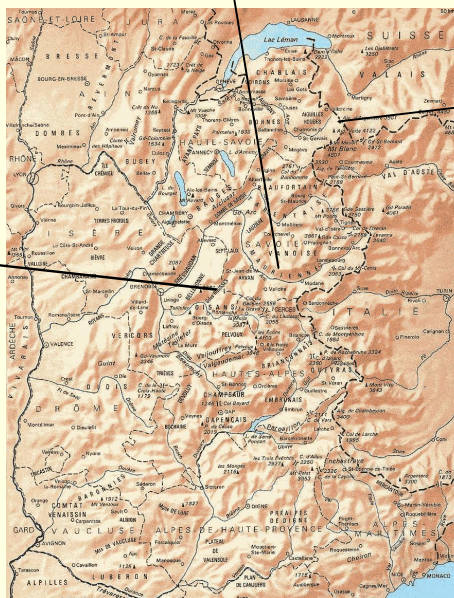


Sources : ONERC / LGGE

Cumul des bilans de masse (e.e)  
(Variation d'épaisseur moyenne) du glacier d'Argentières



Sources : ONERC / LGGE



## Modélisations pour le glacier de Saint Sorlin (France)

Comme les glaciers vont certainement poursuivre leur régression au cours du 21<sup>e</sup> siècle, une équipe de recherche du LGGE a développé un modèle pour estimer l'évolution d'un glacier dans un contexte de changement climatique. Cet outil a été utilisé pour évaluer l'évolution future du glacier de Saint Sorlin dans le massif des Grandes Rousses. Différents scénarios du GIEC (B1, A1B et A2) et différents modèles climatiques (CSIRO-MK3-0, GFDL-CM2-0, etc.) ont été utilisés pour simuler l'évolution de ce glacier avec une fourchette large de valeurs climatiques potentielles.

Les résultats sont variés en raison de la gamme importante de valeurs climatiques utilisées, mais la disparition du glacier est calculée pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle avec le scénario B1 et le modèle GFDLCM2-0 model (cf. fig. 12). D'autres scénarios prévoient une réaction plus ou moins marquée du glacier, mais il est très probable que le glacier de Saint Sorlin disparaisse d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

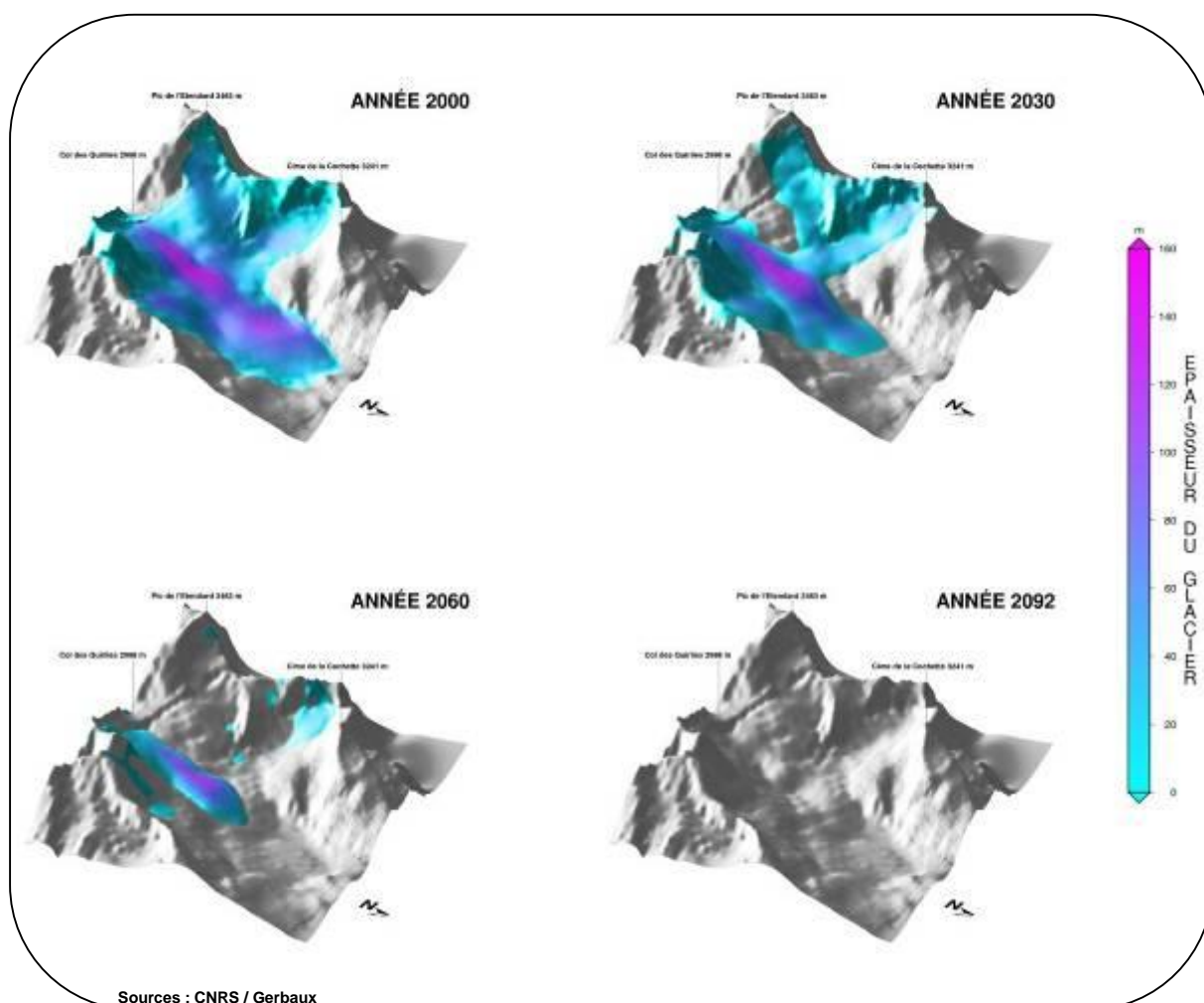


Fig. 12 – Évolution du glacier de Saint Sorlin avec le scénario B1 et le modèle GFDLCM2-0

## Observations dans d'autres pays alpins

### Alpes italiennes

Il existe 1 396 glaciers alpins en Italie qui sont répartis sur 607 km<sup>2</sup> (soit 21 % de la surface englacée alpine). L'analyse des données de l'ICG (*Italian Glacier Committee*) montre que la phase de fonte des glaciers alpins a commencé au milieu du 19<sup>e</sup> siècle avec une exception au cours de la période 1960-1980. Ceci confirme la tendance générale mentionnée précédemment. Il y a eu une perte d'environ 40 % de la surface des glaciers en Italie depuis 1850. Une analyse du pourcentage des glaciers en phase d'avancée pour la période 1980-1999 montre que ce pourcentage est passé de 66 % en 1980 à 4 % en 1999, alors que dans le même temps, le pourcentage des glaciers en phase de retrait est passé de 12 % en 1980 à 89 % en 1999 (en considérant cependant la phase d'avancée généralisée de la période 1960-1980).

Cette tendance est confirmée dans toutes les régions alpines italiennes (cf. fig. 13). Cependant cette approche, basée sur des changements annuels, doit être considérée avec précaution car les importants effets cumulatifs ne sont pas pris en compte. Au cours de la même période, la variation cumulée d'un échantillon de 104 glaciers alpins italiens a montré un retrait moyen de 4.8 m/an. Le retrait total moyen est estimé à environ 95.4 mètres pour cette période. Les Alpes lombardes sont celles qui ont connu le recul le plus important.

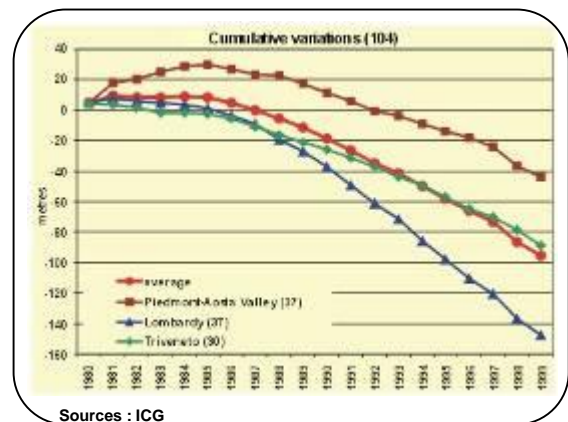
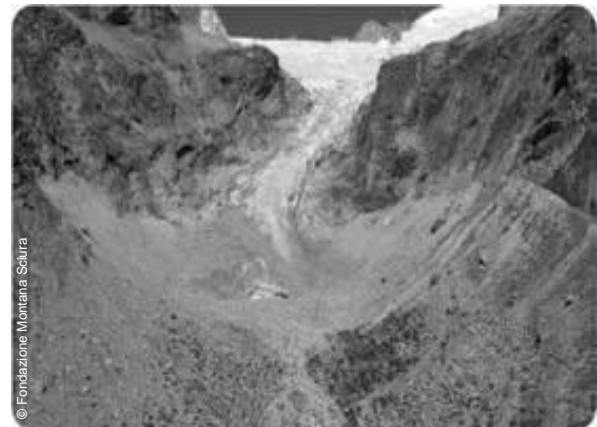


Fig – 13 Longueur cumulée d'un échantillon de 104 glaciers italiens au cours de la période 1980-1999



Le glacier du Pré de Bar (Vallée d'Aoste) en 1929 (gauche) et en 2007 (droite)

### Alpes suisses

Les Alpes suisses contiennent environ la moitié de la surface des glaciers dans les Alpes européennes et les glaciers les plus importants (Aletsch, Gorner, Fiescher, Unteraar). Depuis la fin du Petit Age Glaciaire, vers 1850, la réduction de longueur a été de 3 kilomètres pour la langue glaciaire de vallée d'Aletsch, 1 kilomètre pour le glacier du Trient localisé sur une forte pente et de 300 mètres pour le petit glacier de cirque de Pizol (cf. fig 14).

Entre 1850 et 1973, l'élévation de la ligne d'équilibre des glaciers suisses est remontée en altitude de 70 à 80 mètres, causant une moyenne négative de bilans de masse de quelques dizaines de mètres. A partir des données du dernier inventaire des glaciers (dérivées de données satellitaire) et des comparaisons avec d'anciens inventaires compilés et améliorés grâce à d'anciennes cartes, des photos aériennes et des cartographies sur le terrain, il a été montré que la perte décennale moyenne de surface entre 1985 et 1998/99 est environ 7 fois plus importante que la moyenne de 1850 à 1973. Dans de nombreux cas, les glaciers se désintègrent en petites entités, séparées de leurs anciens affluents et qui montrent des signes d'effondrement. Ceci mène également à la formation de lacs proglaciaires qui accélèrent localement le retrait de la langue glaciaire. Cette perte est particulièrement impressionnante lorsque l'on compare des clichés du 19<sup>e</sup> et du 21<sup>e</sup> siècle.

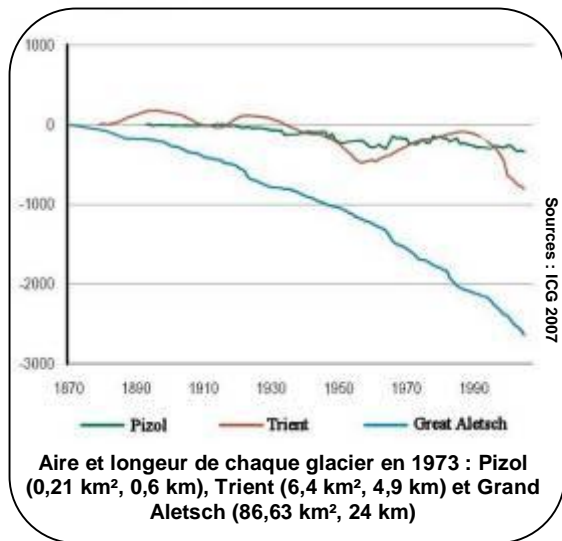


Fig - 14 Variations de longueur cumulée pour les glaciers de Pizol, Trient et Grand Aletsch

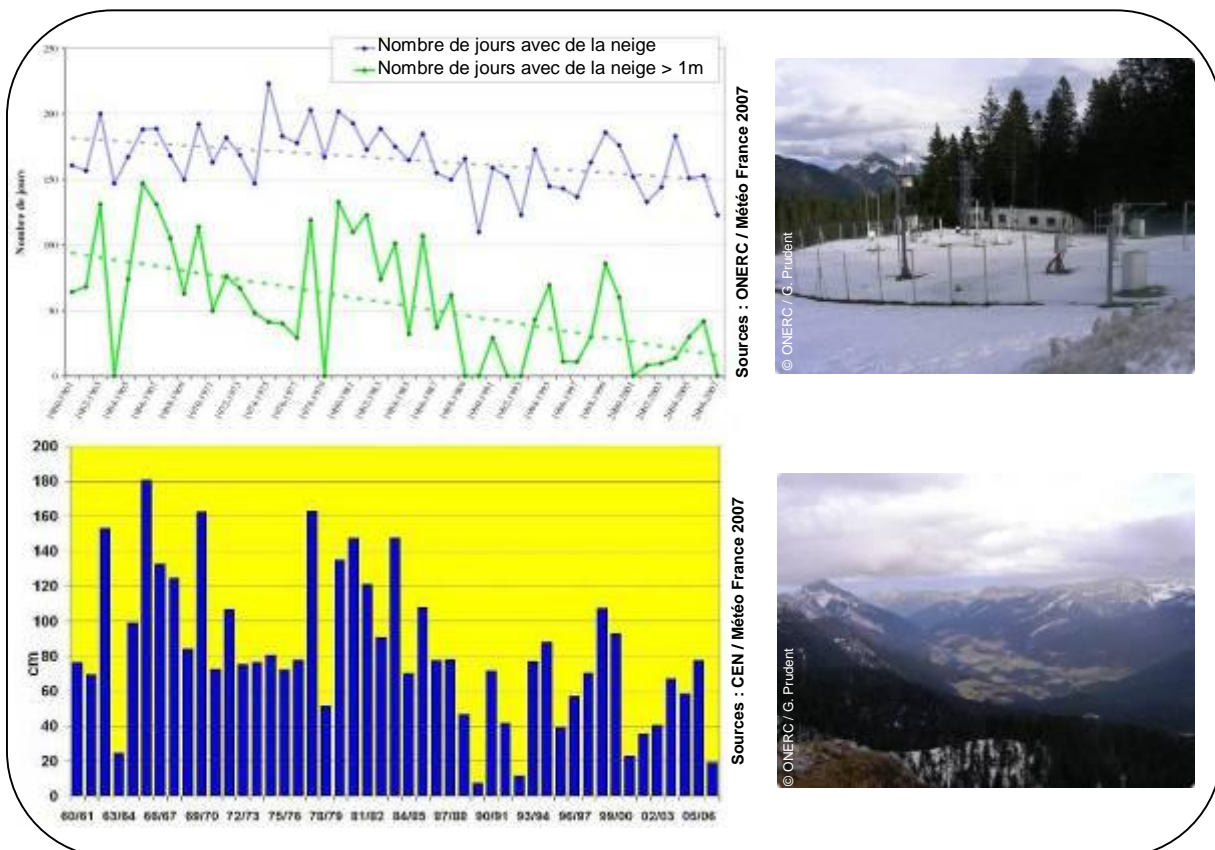


Le glacier du Grand Aletsch (Valais) en 1856 (gauche) et en 2001 (droite)

## Couverture neigeuse

La couverture neigeuse joue un rôle important dans les zones de montagne. Matière première pour le tourisme hivernal, la couverture neigeuse remplit également des fonctions importantes de stockage de l'eau, et d'habitat pour certaines espèces. Elle isole également le sol des températures de l'air et son évolution est donc de première importance pour l'évolution du permafrost. La couverture neigeuse est fortement liée aux températures et aux précipitations, ne serait-ce qu'à travers, le ratio entre précipitations solides et liquides. Mais de nombreux autres facteurs ont également une influence sur le manteau neigeux, parmi lesquels, les effets de l'ombre, de la végétation, la pente et les vents.

Fig. 15 – Durée moyenne d'enneigement au Col de Porte (1360 m) pendant la deuxième décennie de février (a) et hauteur moyenne au même site (b) entre 1960 et 2007



De plus, des forçages à grande échelle, plutôt que des variations locales ou régionales, jouent un rôle dominant dans le contrôle de la quantité et de la durée de la neige dans les Alpes.

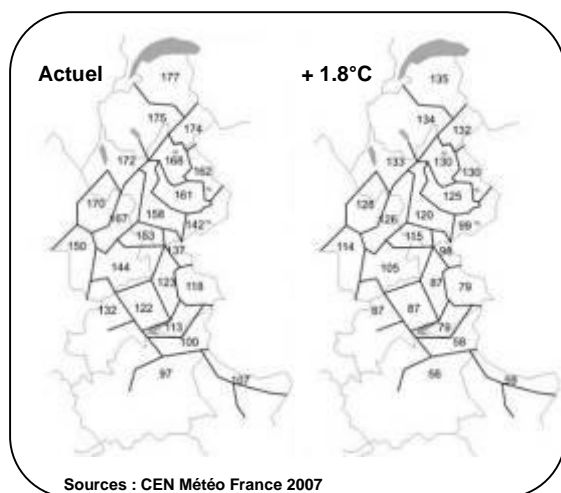
### Observations dans les Alpes françaises

Une très forte irrégularité de l'enneigement a été observée au Col de Porte (site expérimental de Météo France dans le massif de Chartreuse, 1320 m) pour le mois de février entre 1960 et 2000. Malgré cette forte variabilité interannuelle, la tendance générale est une diminution de la hauteur de neige, notamment à cause du faible enneigement des dernières décennies (cf. fig. 15). La hauteur de neige a dépassé 1.5 mètres une fois seulement au cours de la décennie 1990, alors que cette valeur était atteinte trois ou quatre fois par décennie auparavant. La durée d'enneigement a également diminué de manière continue depuis les années 1960 (cf. fig. 15).

## Modélisations dans les Alpes françaises

Le modèle ARPEGE a été couplé au modèle SAFRAN-CROCUS par Météo France pour calculer la réaction de la couverture neigeuse à une augmentation de température de 1.8°C. Cette augmentation des températures a des impacts beaucoup plus marqués sur les zones de basses et moyennes altitudes que sur les zones de haute altitude (> 2 500 m). A haute altitude, l'impact du changement climatique sur la couverture neigeuse est négligeable. A l'inverse, à basse altitude (1 500 m), la durée moyenne de l'enneigement est réduite de plus d'un mois (cf. fig. 16) et la hauteur moyenne de neige est réduite d'environ 40 cm dans les Alpes du Nord (passage de 1 mètre à 60 centimètres) et 20 centimètres dans les Alpes du Sud (passage de 40 centimètres à 20 centimètres).

Fig. 16 – Différence de durée d'enneigement moyenne entre la situation actuelle et une situation à + 1.8°C dans les Alpes françaises



## Observations dans d'autres pays alpins

### Alpes allemandes

Les scientifiques allemands ont clairement identifié une tendance à la diminution de la durée d'enneigement en Allemagne du Sud. Aux plus basses altitudes ( $\leq 300$  m) et aux altitudes

moyennes (entre 300 m et 800 m), le nombre de jours avec une couverture neigeuse a clairement diminué (cf. fig. 17). Entre l'hiver 1951-1952 et l'hiver 1995-1996, des particularités régionales ont été observées.

Dans les parties Est de la région d'étude (parties Est des Alpes et de la forêt bavaroise), la diminution de la durée moyenne d'enneigement aux basses altitudes atteint 20 % à 30 %. Cette tendance faiblit avec l'augmentation de l'altitude et s'inverse même (tendance positive) sur les territoires les plus élevés. Dans les parties Ouest de l'Allemagne du Sud (plaine du Haut-Rhin et parties ouest de la Forêt Noire), la durée moyenne de l'enneigement diminue d'à peu près 50 %, et même plus pour les plus basses altitudes, et décroît de manière plus modérée aux altitudes moyennes (de 20 % à 30 %). Dans ces territoires, la tendance faiblit avec l'altitude.

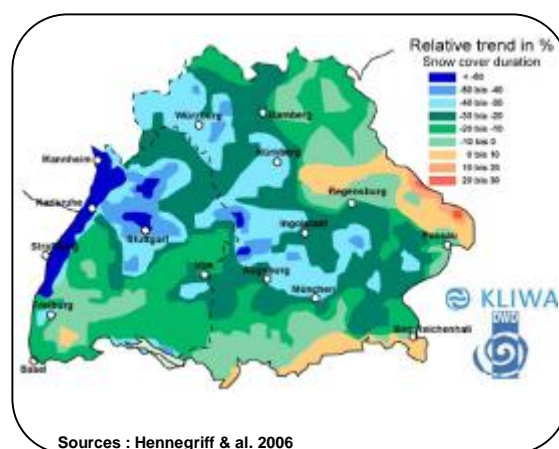


Fig. 17 – Tendance relative de la durée moyenne d'enneigement en Allemagne du Sud (période 1951-1996)

## Alpes italiennes

Une analyse historique de la couverture neigeuse dans les parties sud des Alpes italiennes a été conduite en utilisant des données issues de 40 stations de mesure. La méthode utilisée pour détecter une tendance est basée sur l'indice sans dimension SAI (Standardized Anomaly Index). Cet indice montre des anomalies de quantité pour les moyennes annuelles ou saisonnières de chaque station. La variabilité interannuelle de la couverture neigeuse est très significative sur la période 1920-2005 mais une tendance à une baisse généralisée de l'enneigement dans les Alpes italiennes est observée (cf. fig. 18). Au cours de la période 2003-2006, les accumulations hivernales étaient même 40 % en deçà des conditions normales (moyenne 1959-2002) à la station météorologique du Lago Valsoera (2440 m, massif du Gran Paradiso).

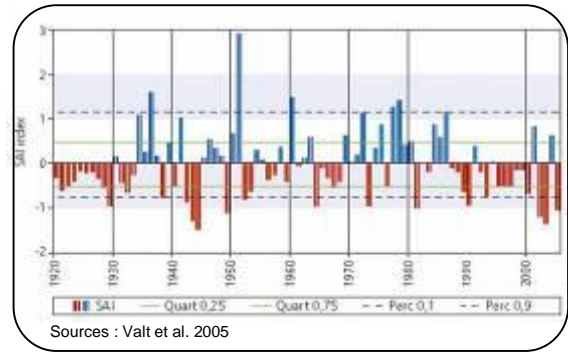
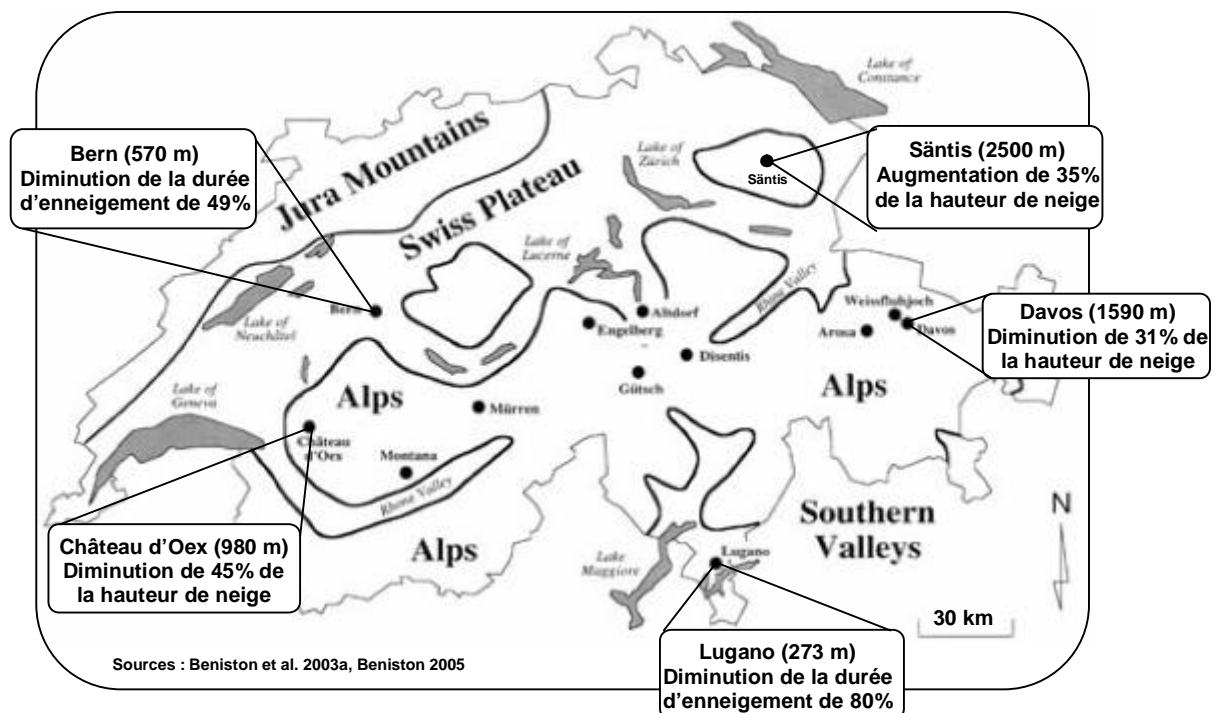


Fig. 18 – Neige cumulée en Italie entre 1920 et 2006

## Alpes suisses

La hauteur de neige montre une forte variabilité à court terme et des fluctuations marquées à long terme. La couverture neigeuse (définie ici comme le nombre de jours avec au moins 20 centimètres de hauteur de neige) indique une tendance similaire à celle de la hauteur de neige. La variabilité est plutôt limitée au début du 20<sup>e</sup> siècle et augmente par la suite. Les plus grosses chutes de neige sur 3 jours et le cumul total journalier de neige fraîche au cours de l'hiver restent stables mais montrent une variabilité très importante d'une année à l'autre. D'une manière générale, la durée et la hauteur de la couverture neigeuse ont diminué dans les montagnes suisses (cf. fig. 19).

Fig. 19 – Évolution de la couverture neigeuse (durée et hauteur) en Suisse au cours de la période 1960-1990



## Permafrost alpin

Le permafrost<sup>6</sup> est un sol gelé de manière pérenne et défini comme un sol ou tout autre matériau de la lithosphère (incluant les socles rocheux mais excluant les glaciers), à une profondeur variable sous la surface de la terre, dans lequel des températures inférieures au point de congélation de l'eau ont existé de manière continue pour une longue période, de deux à plus de mille ans. Le permafrost influence l'hydrologie et la stabilité des versants de débris à forte pente. En effet, le permafrost qui est riche en glace, agit comme une barrière contre la percolation de l'eau souterraine et peut impliquer une saturation locale dans des débris non gelés. La fonte du permafrost dans des matériaux non consolidés a par ailleurs pour conséquence une augmentation de la pression interstitielle et une perte de cohésion. De plus, la pénétration d'un front de gel dans des matériaux préalablement fondus peut intensifier la destruction d'une roche par la formation de glace dans les fissures. De telles formations de glace réduisent en retour la perméabilité des parois rocheuses considérées et affectent les pressions hydrauliques à l'intérieur des parties non gelées des roches fissurées. Le climat influence le permafrost, et plus particulièrement les fluctuations de la couche active du permafrost. Cette couche est la partie du permafrost qui fond partiellement pendant l'été et les périodes de transition. La couverture neigeuse joue un rôle particulièrement important pour les régimes de permafrost ; ainsi, l'étendue et la durée du couvert neigeux sont des facteurs critiques pour l'évolution du permafrost. Si un manteau neigeux épais existe en automne, il isole le sol de l'atmosphère et préserve la chaleur accumulée

au cours de l'été. De manière similaire, une fonte prématurée du manteau neigeux au printemps expose le permafrost au réchauffement des températures de l'air et aux radiations solaires alors qu'une fonte retardée du manteau préserve la fraîcheur du sol sur une plus longue période de temps. Par exemple, l'hiver 2002-2003 dans les Alpes suisses a connu des chutes de neige assez tôt en automne et une fonte prématurée du manteau au printemps. De ce fait, le permafrost avait déjà connu un « hiver défavorable » avant de faire face à la vague de chaleur de l'été 2003<sup>7</sup>. Ce phénomène a également été observé en France, au glacier rocheux du Laurichard au cours de l'hiver 2003-2004. L'effet de la couverture neigeuse est beaucoup moins important pour le permafrost localisé dans les sommets abrupts et a fortiori dans les parois rocheuses. Le réchauffement et la dégradation du permafrost dans les arêtes, les sommets et les pics sont plus rapides et plus intenses car le front de chaleur vient de plusieurs côtés à la fois. A partir des observations, des réflexions théoriques et des simulations numériques, la dégradation du permafrost semble d'importance majeure pour les aléas naturels, comme les chutes de rochers, les coulées de boues, les laves torrentielles et les interactions avec d'autres phénomènes dangereux comme les glaciers suspendus. Ces thématiques sont développées plus loin dans la partie « risques naturels » de ce rapport.

### Observations dans les Alpes

Le permafrost dans les Alpes occupe aujourd'hui une aire qui est comparable à la surface englacée. Par contre, l'évolution séculaire du permafrost est bien moins connue que celle des glaciers par manque d'observations.

<sup>6</sup> Aussi appelé pergélisol en français

<sup>7</sup> R. Delaloye, communications personnelles, 2007.



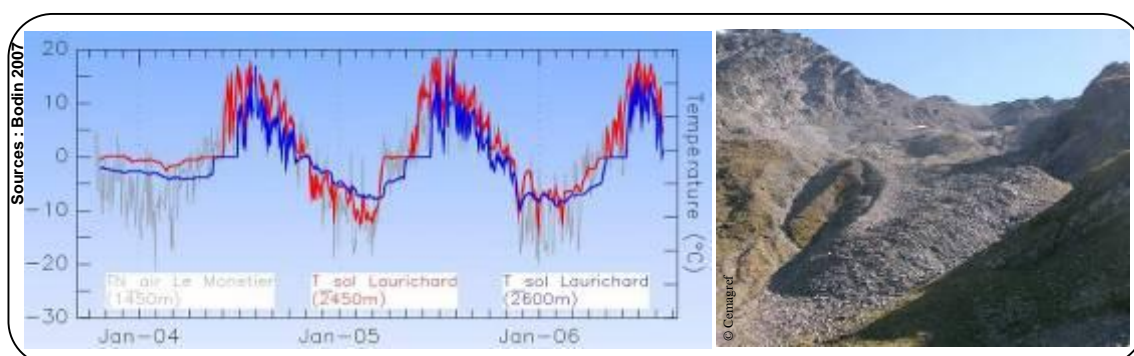
La fonte graduelle du permafrost alpin a débuté depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Le permafrost alpin est typiquement épais de quelques décimètres à plus d'une centaine de mètres. Sa température moyenne annuelle de surface est comprise entre le point de fonte et  $-3^{\circ}\text{C}$  pour les zones de débris. Par contre, des sommets rocheux gelés de manière permanente peuvent présenter des températures bien en dessous de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Les glaciers rocheux réagissent également à l'augmentation des températures de l'air. En principe, la fonte d'une partie de la glace contenue dans les glaciers rocheux se traduit par une accélération des déplacements. L'évolution de la vitesse de déformation des glaciers rocheux est un trait commun à l'ensemble des Alpes, avec une augmentation au cours des dernières années, comprise entre 20 % et 100 % dans les Alpes françaises, suisses et autrichiennes. Des mesures dans les 60 premiers mètres du sol montrent des températures de surface plus ou moins stables entre 1950 et 1980. Comme conséquence du réchauffement exceptionnel observé depuis les années 1980, le taux annuel de fonte de la glace contenue dans le permafrost alpin semble avoir plus que doublé depuis les années 1970 et atteint la dizaine de centimètres par an. Des observations conduites dans des trous de forage indiquent également que les températures du permafrost sont actuellement en train d'augmenter à des taux élevés mais qu'elles sont très fortement influencées par les conditions neigeuses hivernales.

Le réchauffement rapide du permafrost alpin au 20<sup>e</sup> siècle, compris entre  $0.5^{\circ}\text{C}$  et  $0.8^{\circ}\text{C}$  dans les premières dizaines de mètres du sol, est confirmé par des mesures de forages. Des chercheurs du projet PACE (Permafrost and Climate in Europe) ont mis en évidence des augmentations de température de  $+0.5^{\circ}\text{C}$  à  $+2^{\circ}\text{C}$  au cours des 60-80 dernières années dans le permafrost des régions européennes de montagne, depuis la Sierra Nevada en Espagne jusqu'à l'archipel arctique du Svalbard. L'été 2003 a été particulièrement important pour l'évolution du permafrost, ce dernier étant très sensible aux fortes températures estivales.

### Gacier rocheux du Laurichard (France)

La vitesse d'écoulement du glacier rocheux du Laurichard (Hautes-Alpes) montre une succession d'accélération et de ralentissements durant les dernières décennies. Entre 1979 et 1997, cette vitesse était d'environ 25 cm/an avec une légère inflexion depuis 1986. Par la suite, l'écoulement a accéléré jusqu'à atteindre un maximum en 2001. Puis, les valeurs de vitesse sont redevenues similaires à celles de la période 1980-1990. L'hiver neigeux 2003-2004 a clairement empêché le refroidissement du sol, en gardant la chaleur accumulée pendant l'été 2003 (cf. fig. 20). Ceci peut expliquer les vitesses élevées et la subsidence de surface du glacier (par fonte de la partie supérieure du permafrost) qui ont été observées en 2004.

Fig. 20 – Températures du sol au Laurichard (2450 et 2600 m) et températures de l'air à Monetier entre Octobre 2003 et Septembre 2006



## Permafrost et glaciers rocheux dans les Alpes suisses

La plus longue série continue de mesures de température dans le permafrost de montagne en Europe est le forage de 58 mètres de Murtèl-Corvatsch (Engadine, Suisse) qui a été creusé en 1987 dans des débris en léger mouvement, riches en glace. Cette surveillance à long terme des températures du sol a clairement montré la sensibilité du permafrost de montagne aux évolutions de la température de l'air mais surtout de l'épaisseur et de la durée du couvert neigeux). Un réchauffement rapide des 25 premiers mètres du permafrost a été observé entre 1987 et 1994. Durant cette période, la température moyenne en surface du sol est passée de  $-3.3^{\circ}\text{C}$  à  $-2.3^{\circ}\text{C}$ . A 11.6 mètres de profondeur (dans la couche active), le permafrost s'est réchauffé d'environ  $0.6^{\circ}\text{C}$ . A 20 mètres de profondeur (en dessous de la couche active), ce réchauffement n'est plus que de  $0.2^{\circ}\text{C}$ .

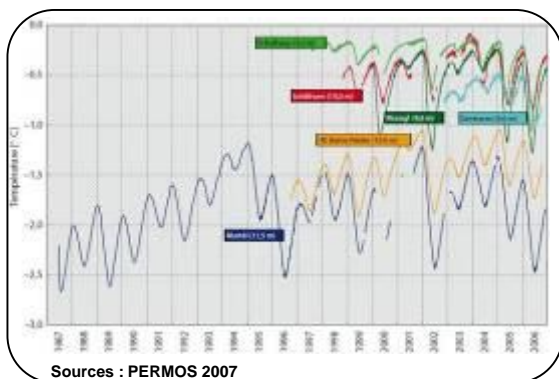


Fig. 21 – Températures du sol (à 10 m de profondeur) pour différents sites de mesures suisses du réseau PERMOS

Cependant, des faibles chutes de neige en décembre et janvier pendant l'hiver 1994-1995, suivies par des chutes modérées pendant l'hiver 1995-1996 ont causé un refroidissement intense du sol et les températures du permafrost sont revenues à des valeurs comparables à celles de 1987. Le manteau neigeux était mince en début de saison pendant l'hiver 1998-1999 et les températures du sol sont restées basses en

1999, 2000 et 2001. L'analyse de cette longue série de données, complétée par des mesures plus récentes obtenues dans d'autres sites de mesures en Suisse, montre que le permafrost s'est réchauffé depuis le début des mesures. Ce réchauffement s'est fait en trois étapes, avec une interruption au cours de l'hiver 1995/1996 et un refroidissement depuis 2002 (cf. fig. 21). Ces ruptures dans la tendance générale de réchauffement ou ces refroidissements sont principalement la conséquence d'hivers avec une couverture neigeuse limitée. Le changement climatique semble également avoir des impacts marqués sur les glaciers rocheux suisses. Dans le vallon des Yettes Condjà (Valais), les mouvements de surface de l'un des glaciers rocheux ont augmenté de plus de 100 % entre 2001 et 2004 et de 76 % pour l'autre glacier rocheux (cf. fig. 22).

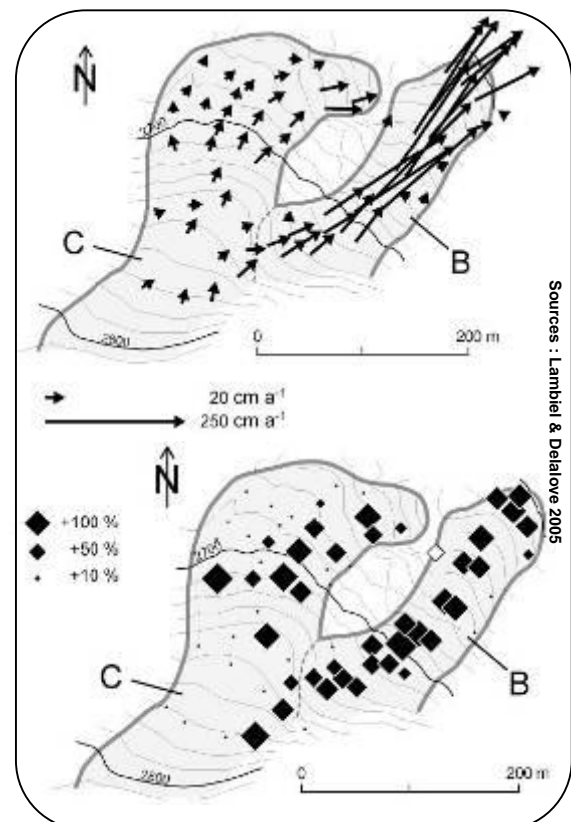


Fig. 22 – Glaciers rocheux du vallon des Yettes Condjà (Valais, Suisse) : vitesses horizontales de surface en 2003-2004 (haut) et variations des vitesses horizontales de surface entre 2001 et 2004 (droite)

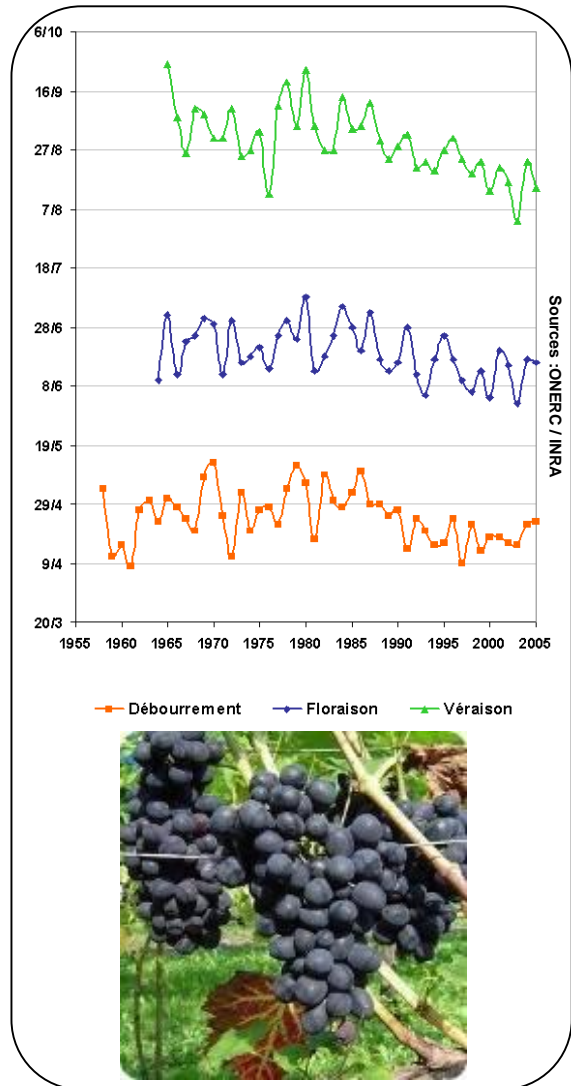
## Végétation alpine

### Observations de la végétation en France et dans d'autres pays alpins

Le changement climatique a déjà affecté la végétation, de manière directe et de manière indirecte. Par exemple, les paramètres climatiques ont un impact direct sur la physiologie des plantes alors que des changements de répartition des parasites et insectes vecteurs de maladies (fortement conditionnés par l'évolution du climat) sont un impact indirect. De plus, il est toujours difficile d'évaluer quelle est la part des paramètres climatiques dans l'évolution de la végétation alpine. En effet, la végétation dans les Alpes est soumise depuis plus d'un millénaire à de nombreuses modifications issues des activités humaines (défrichement, déprise agricole, introduction d'espèces, mobilisation de la ressource en eau, etc.). Impact direct facilement observable, le changement climatique a déjà rallongé la durée de la période végétative (pas uniquement dans les Alpes), avec un débourrement plus précoce et une chute des feuilles plus tard dans la saison (cf. fig. 23).



Fig. 23 – Dates de débourrement, de floraison et de véraison à Colmar (Alsace)



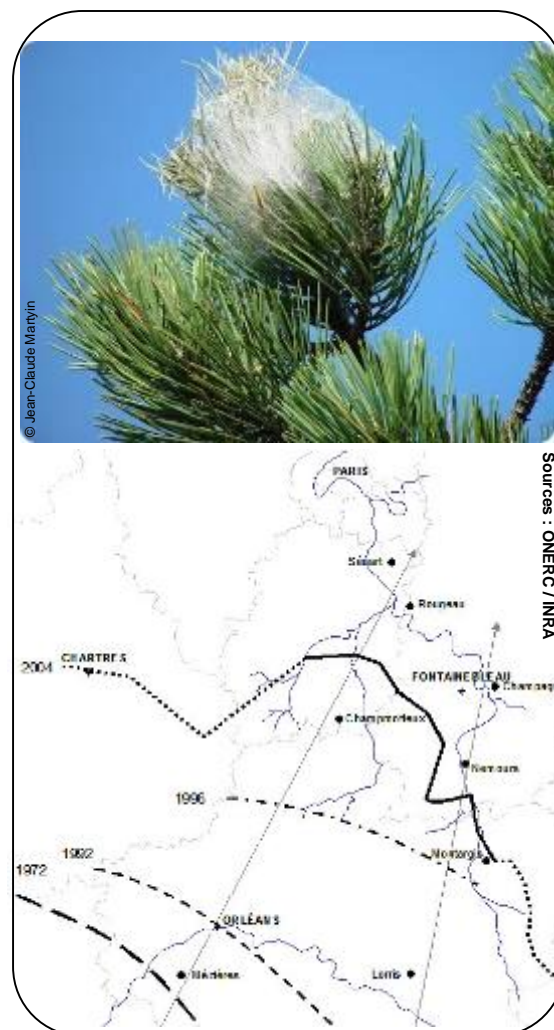
Depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle, une augmentation de la croissance des forêts a été observée en Europe. Ce phénomène est relativement généralisé avec quelques particularités régionales. Par exemple, la croissance annuelle du hêtre a augmenté de 25 % dans le Nord-ouest de la France et de 50 % dans le nord-est de la France au cours de la période 1900-2000. Le changement climatique est l'une des hypothèses avancées pour expliquer cette augmentation de la croissance forestière mais il est encore difficile de déterminer les rôles respectifs de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> et de l'évolution du climat sur la production des tissus vivants.

Une évolution de la répartition des espèces est également observée, à la fois en altitude et en latitude. Par exemple, une extension généralisée des Lauryphilles (espèces avec des feuilles coriaces, larges et persistantes) a été observée, de même qu'une remontée en altitude de certaines espèces (+ 200 m pour le gui en Valais suisse entre 1910 et 1995).



Enfin, des impacts « néfastes » pour la situation actuelle de la végétation ont également été observés. Des parasites et leurs vecteurs se développent à cause de températures plus clémentes (cf. fig. 24, cette figure illustre la progression d'un parasite dans le bassin parisien mais le mécanisme est similaire pour les Alpes, avec en plus une progression possible des parasites en altitude). L'augmentation des températures peut également avoir des conséquences dramatiques sur la disponibilité en eau. Ainsi, lors de la canicule 2003, la sécheresse a été la plus rude pour les populations de feuillus sur les 50 dernières années et a causé un pic significatif de mortalité.

Fig. 24 – Progression de la chenille processionnaire du pin dans le bassin parisien entre 1972 et 2004



### Projections sur l'évolution de la végétation en France

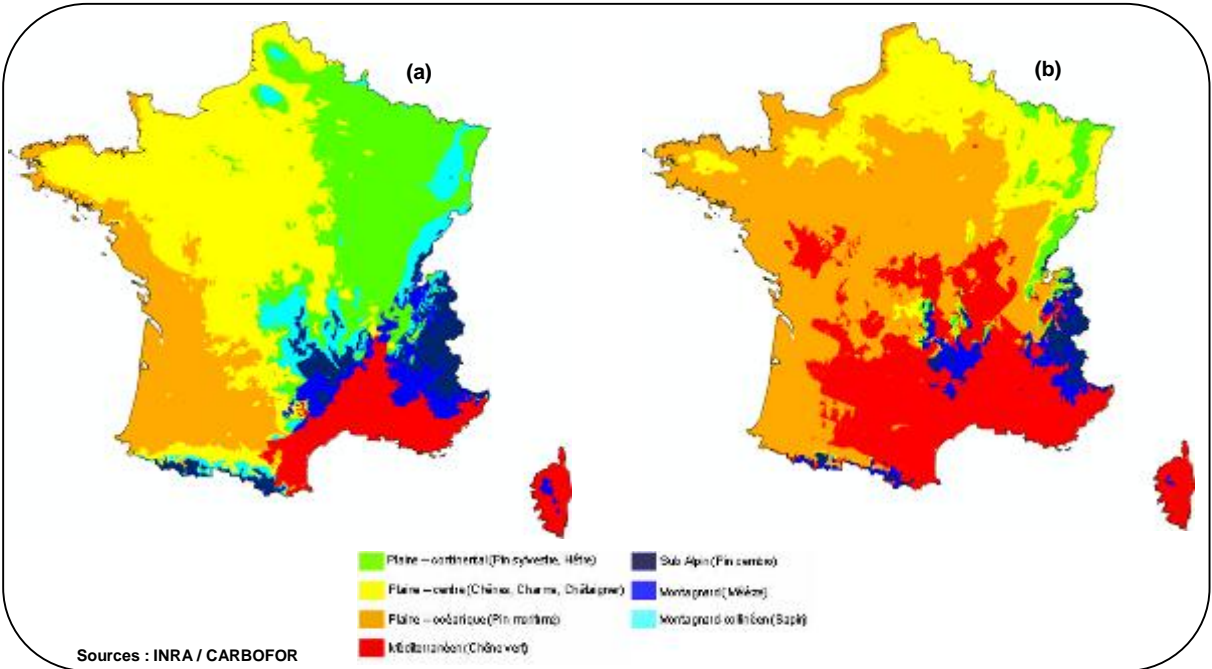
Les projections sont similaires aux impacts déjà observés sur la végétation, mais, les impacts « bénéfiques » ne devraient être sensibles que jusqu'à ce qu'un seuil soit atteint. A partir d'une certaine limite, l'augmentation de la productivité végétale devrait être contrebalancée par une réduction de la disponibilité en eau pour la végétation. Le bilan entre les impacts « positifs » et « négatifs » est difficile à évaluer. En utilisant des modèles, les scientifiques sont capables de proposer des directions générales quant à la future évolution de la végétation.

Par exemple, le débourrement surviendrait de 6 à 10 jours plus tôt pour les feuillus et de 15 à 20 jours plus tôt pour le pin maritime. Pour les pins et l'épicéa (espèces qui ont besoin de périodes de froid), ce débourrement précoce surviendrait surtout en altitude. Le risque de gel serait réduit pour toutes les espèces. Cependant, ces modèles n'intègrent pas encore tous les paramètres, notamment les effets des maladies et des parasites. Concernant le couvert forestier, les modèles prévoient une progression générale des aires bioclimatiques océaniques et méditerranéenne ainsi qu'une régression importante des aires bioclimatiques de montagne (cf. fig. 25).



**Fig. 25 – Répartition géographique de 7 groupes chorologiques pour le climat actuel (a) et pour les projections climatiques simulées par le modèle ARPEGE (b)**

L'évolution de la forêt est importante pour la sylviculture mais elle a aussi des conséquences sur le paysage et sur la protection contre les risques naturels. Par exemple, la progression des feuillus au détriment des conifères dans les zones de montagne pourrait d'une part améliorer la protection contre les chutes de rochers et d'autre part réduire la protection contre les avalanches ; en effet, le tronc des feuillus est plus résistant mais les conifères assurent une meilleure stabilisation du manteau neigeux. La biodiversité montagnarde pourrait également être réduite avec les changements climatiques. La réponse naturelle de la végétation au réchauffement sera de migrer en altitude. Pour chaque degré d'augmentation, la migration des espèces en altitude est estimée à environ 150 m. Cependant, les espèces qui sont déjà localisées à la limite de leur tolérance climatique pourraient n'avoir aucun espace où migrer. De plus, les espèces endémiques ont généralement une tolérance climatique limitée, alors qu'à l'inverse, les espèces envahissantes ont généralement une assez bonne tolérance climatique. Ainsi, avec le changement climatique, la pression exercée par les espèces invasives serait accrue, de même que la compétition biologique.





© ONERC / G. Prudent

# Influence du climat et impacts du changement climatique sur les aléas naturels dans les Alpes



© O. All

## Crues – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

Les crues sont des augmentations plus ou moins rapides et durables du niveau des eaux qui peuvent conduire à des inondations (par infiltration, rupture de digue, etc.). Les crues font partie du cycle naturel des rivières. L'implantation d'enjeux humains dans le lit majeur d'une rivière met donc ces derniers dans une situation potentielle d'inondation.

### Données concernant les crues dans les Alpes

Les crues sont relativement bien observées dans le temps et dans l'espace. Des réseaux de surveillance et d'observation sont installés sur la plupart des rivières alpines et périalpines. Les Alpes fournissent d'ailleurs des parties importantes des bassins versants de grands fleuves européens. Ainsi, 20 % des eaux du Rhône et 67 % des eaux du Rhin proviennent de la zone alpine. Sur des fleuves tels que le Rhône ou le Rhin, il existe des chroniques assez longues de mesures des débits. De plus, des reconstructions historiques (comme celles de C. Pfister en Suisse) permettent d'avoir une idée de l'activité des crues pour les périodes pré-instrumentales.

### Sensibilité des crues aux paramètres climatiques

Le lien entre paramètres climatiques et crues des rivières est obscurci par de nombreux facteurs anthropiques (ceci est encore plus vrai que pour les événements torrentiels). Les changements d'occupation des sols modifient fortement les écoulements de surface et les ruissellements. On peut dire qu'il n'existe plus de bassin versant dans l'arc alpin qui ait un schéma de

ruissellement entièrement « naturel » : les prélèvements agricoles faussent les bilans hydriques, les aménagements hydrauliques peuvent influencer sur les caractéristiques des cours d'eau, les barrages modifient radicalement le régime des écoulements, les ouvrages de protection et autres micro-centrales introduisent de nombreux « bruits » dans l'analyse des fréquences et des intensités des crues. Par ailleurs, les mesures « apaisantes » (digues, forêt de protection, etc.) ont plutôt été mises en place dans la première partie du 20<sup>e</sup> siècle alors que les mesures « aggravantes » (bétonnage des berges, imperméabilisation des sols, etc.) sont plutôt intervenues dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle.



L'hypothèse généralement établie est que dans un climat plus chaud, les situations favorables aux crues pourraient augmenter (avec le postulat que plus d'énergie dans le système climatique provoquerait une intensification du cycle de l'eau). Il existe cependant un manque de « transfert » entre les résultats des scénarios climatiques et les incidences possibles sur les bilans hydriques et les débits de rivières. Les impacts proposés jusqu'alors étaient avant tout qualitatifs. C'est dans l'objectif d'obtenir des résultats quantitatifs que des projets de modélisation hydrologique à l'échelle de la Suisse et de l'Allemagne sont actuellement en cours de développement.

Les modèles climatiques prévoient une augmentation des précipitations à certaines périodes de l'année et une diminution des précipitations à d'autres périodes de l'année. On s'attend alors à ce que l'évolution des crues suive celle des précipitations. Or le comportement non linéaire de la relation pluie-débit et une série d'effets tampons peuvent atténuer l'impact des précipitations sur les bassins versants vastes. Dans le cas des torrents, le filtre du bassin versant est moins important et la sensibilité à une fluctuation des précipitations est plus marquée.

### Impacts observés du changement climatique sur les crues

**Intensité des crues :** Au niveau mondial, environ 70 % des débits de rivières ne présentent pas de tendances significatives. Lorsque les tendances sont significatives, elles se partagent entre croissance et décroissance des volumes de crues. En France, plusieurs études s'accordent sur le fait qu'il n'y a pas de tendance significative d'évolution des volumes de crue depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Ces constats sont également valables pour l'Europe Centrale (Elbe et Oder). Cependant, en Allemagne du Sud, l'examen des séries temporelles de débit montre une augmentation régionale des débits pour certaines stations au cours des 30 – 40 dernières années ; mais aucun changement n'a été détecté dans des séries temporelles plus longues (70 à 150 ans).

**Fréquence des crues :** Dans les Alpes, une augmentation de la fréquence des crues « extrêmes » a été enregistrée au cours des 20 dernières années par rapport à la moyenne du 20<sup>e</sup> siècle. En Allemagne du Sud, le projet KLIWA conclut que la fréquence des crues a

augmenté depuis les années 1970, à l'exception du sud de la Bavière (c'est-à-dire la frange nord de la chaîne alpine). Des crues importantes ont, par exemple, touché la Suisse en août 1987, septembre 1993 et octobre 2000, et plus particulièrement le Tessin en 1978, 1987, 1993 et 1994. Mais la recrudescence de ces crues semble toujours être dans les limites de la variabilité naturelle des crues. Le même type de conclusions a été obtenu pour les crues en Europe Centrale (Oder et Elbe). En France, les études statistiques ne font pas état d'une évolution significative de la fréquence des crues.

### Intensité / fréquence des crues et saisonnalité :

Une augmentation des débits estivaux pour les rivières alimentées par des glaciers, en lien avec une fonte accrue des glaciers en été, a été observée dans les Alpes. A court terme (avant que la ressource glaciaire ne s'épuise), ceci a un effet de soutien des étiages, mais pas d'impact sur les crues. En Allemagne du Sud, le projet KLIWA fait état d'une augmentation des débits mensuels hivernaux depuis les années 1970 (en comparaison avec les valeurs précédentes, disponibles depuis 1931). En France, des changements du régime des crues et des étiages ont été détectés seulement pour quelques régions dont les massifs montagneux (Alpes et Pyrénées), pour lesquels l'augmentation des températures induit une date de fonte nivale plus précoce et des étiages respectivement plus et moins sévères (en absence ou en présence de stock neigeux).



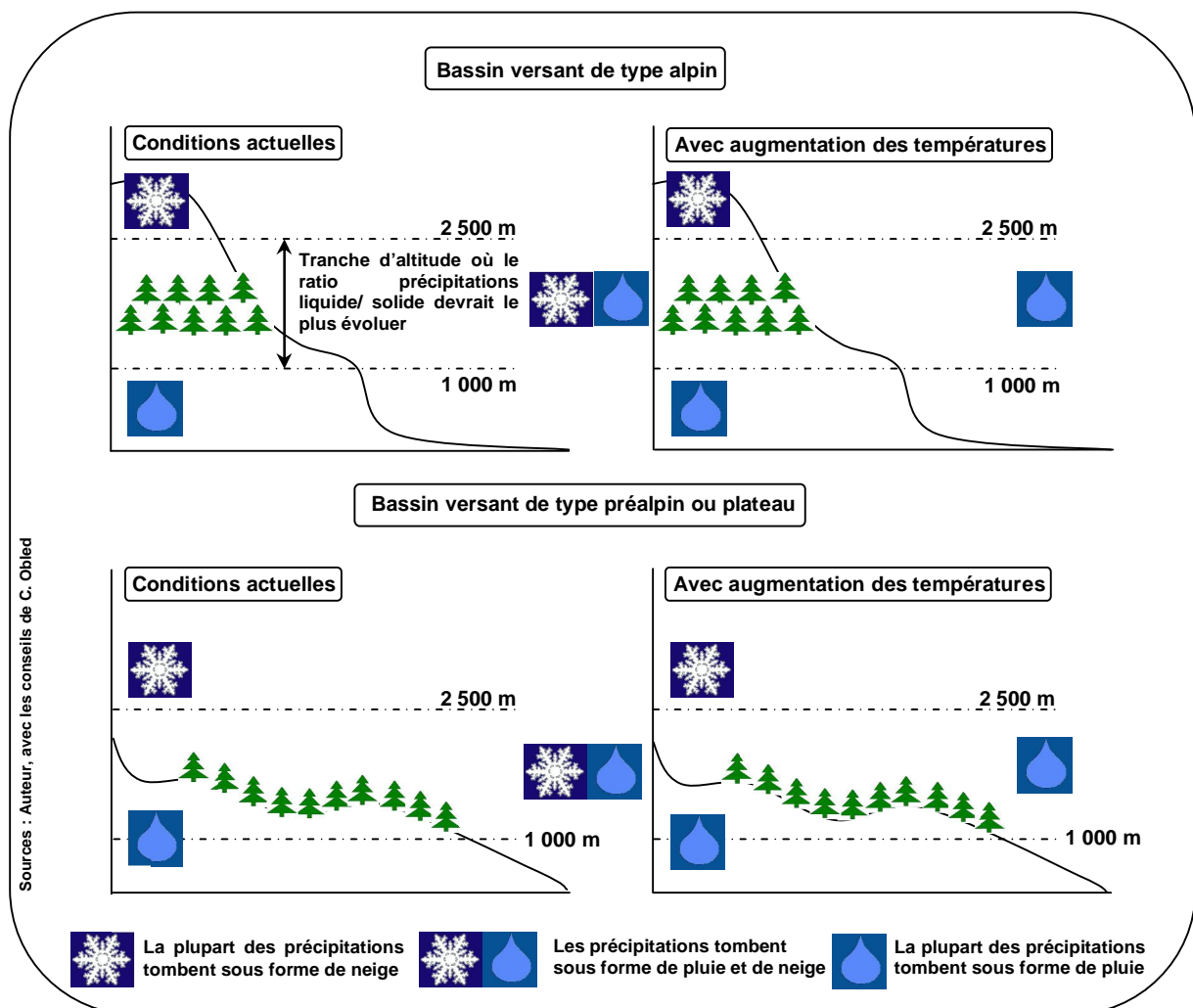


## Impacts potentiels du changement climatique sur les crues

**Intensité / fréquence des crues et saisonnalité :** L'augmentation des précipitations hivernales simulée par les modèles et la réduction de l'effet tampon du couvert neigeux (liée à l'élévation altitudinale de la limite pluie/neige) devraient conduire à une augmentation des crues hivernales (à la fois en terme d'intensité et de fréquence). En fonction de la topographie du bassin versant, ces impacts peuvent être d'importance majeure, notamment si le bassin est constitué par de larges zones à moyenne altitude ( $\approx 1000 - 2500$  m) avec une couverture neigeuse conséquente (cf. fig. 26). D'un autre côté, l'intensité des crues de fonte printanière devrait être réduite en raison d'une fonte plus graduelle d'un manteau neigeux réduit.

Ce pic de fonte pourrait également survenir un mois plus tôt. D'une manière générale, les étiages et même les sécheresses devraient être plus fréquents pendant l'été à cause de précipitations estivales réduites et d'une évapotranspiration accrue. Enfin, les rivières alimentées par des glaciers (qui représentent des stocks d'eau importants) pourraient connaître une compensation des basses eaux en été avec une fonte accrue des glaciers sur le court terme. Sur le plus long terme, une fois que les glaciers auront perdu une grande partie de leur volume (et/ou de leur surface) et, par là même, leur fonction de stockage de l'eau, les débits estivaux de ces rivières devraient également diminuer.

Fig. 26 – Évolution schématique du ratio hivernal précipitations liquide/solide pour un bassin versant de type alpin et un bassin versant de type préalpin/plateau



## Laves torrentielles et crues torrentielles – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

Les torrents sont des cours d'eau de montagne de faible longueur, à forte pente (> 6 % environ), caractérisés par des crues soudaines et violentes. Ces torrents se jettent à l'aval dans des rivières torrentielles, de pente plus faible, comprise entre 1 % et 6 %, où les crues restent brusques et les transports de sédiments importants en conséquence de leur pente encore soutenue. En fonction du pourcentage de matériaux solides, le transport de sédiments dans les crues torrentielles peut avoir lieu sous forme de charriage torrentiel, d'écoulements hyper-concentrés ou de laves torrentielles. Les laves torrentielles sont déclenchées en général à l'occasion de pluies intenses, générant des écoulements capables de mettre en mouvement de grandes quantités de matériaux non consolidés (boue, blocs rocheux, débris divers, etc.). Le volume de ces écoulements est constitué de plus de 50 % de matériaux solides de différentes tailles, des matériaux fins jusqu'à des rochers de plusieurs mètres cube. Les laves torrentielles peuvent être très destructrices, même lorsqu'elles sont relativement lentes.

### Données concernant les aléas torrentiels dans les Alpes

Les laves torrentielles et autres aléas torrentiels (comme le charriage) sont relativement difficiles à observer. Il en va de même pour les facteurs de prédisposition, de déclenchement et les facteurs aggravants des aléas torrentiels. Il existe notamment un manque de couverture pluviométrique, c'est-à-dire un réseau de mesure des précipitations qui soit adapté aux

phénomènes torrentiels. Mis à part quelques cas particuliers de bassins versants expérimentaux, les stations de mesures sont rarement localisées à proximité des zones d'aléas et les données météorologiques doivent être extrapolées à partir de stations éloignées. Les données pluviométriques fournies par les stations météorologiques ont des limites pour l'étude des liens entre aléas torrentiels et paramètres climatiques. En effet, le fort gradient altitudinal des précipitations dans les reliefs montagneux rend souvent inexploitable les mesures des stations permanentes de fond de vallée ou de piémont. Par exemple, lors des crues d'août 2005 dans le massif de Belledonne (France), 278 mm de pluie ont été enregistrés en 48 heures au refuge de La Pra à 2 100 m d'altitude pour seulement 32 mm à 220 m d'altitude pour la station automatique du Versoud. Pour vraiment caractériser les situations météorologiques associées au déclenchement d'aléas torrentiels sur un site donné il faut pouvoir disposer de stations sur ce même site, ou tout du moins d'un réseau représentatif sur le massif, avec un bon étagement en altitude. L'installation de stations automatiques de mesures des débits n'est pas réellement possible car ces dernières seraient emportées lors des épisodes de crues torrentielles. Même une observation directe pendant ces événements n'est pas chose facile car il est impossible d'estimer correctement le débit d'un torrent en crue. Des dispositifs de surveillance automatique des torrents existent en Suisse, mais ils servent avant tout à donner l'alerte et ne fournissent pas de données instrumentales exploitables.

Les torrents font l'objet d'observations de terrain ponctuelles et dispersées. Ceci ne veut pas dire pour autant qu'il n'existe pas du tout de données sur les torrents et les phénomènes qui les affectent, mais ces données sont trop éparses et hétérogènes, ou trop rarement synthétisées à l'échelle d'une région, pour pouvoir proposer une analyse solide de leur évolution. En France, ces observations sont réalisées sur le terrain par les services RTM dans les Alpes et les Pyrénées. Ces études spécifiques de bassins versants proposent généralement de longues chroniques d'événements mais avec les limites exposées plus haut, notamment l'estimation difficile des volumes. L'appréciation des quantités de matériaux transportés est toutefois plus aisée, surtout pour les gros blocs (comme ceux supérieurs à un mètre de diamètre).

De plus, même si le charriage torrentiel et les écoulements hyper-concentrés représentent des enjeux importants en terme de gestion opérationnelle, l'impact du changement climatique sur ces deux phénomènes est très peu analysé dans la littérature scientifique disponible, en comparaison avec les laves torrentielles. C'est pourquoi les prochains paragraphes se concentrent sur les laves torrentielles. Ceci ne doit pas occulter l'importance des autres phénomènes torrentiels.



## Sensibilité des laves torrentielles aux paramètres climatiques

Les laves torrentielles sont avant tout causées par des abats d'eau brutaux sur des bassins versants où des matériaux mobilisables sont disponibles. L'occurrence des précipitations intenses et la disponibilité en matériaux mobilisables sont les deux principales composantes des laves torrentielles qui peuvent être affectées par un changement climatique. Les valeurs seuils de déclenchement sont très variables d'un massif à l'autre et même d'une zone productrice de lave à une autre. Deux principaux types de situations susceptibles de déclencher des aléas torrentiels peuvent toutefois être mentionnés :

- ☞ Les orages de printemps / début d'été (mai, juin et juillet) avec des événements localisés, assez brefs (1 à 4 heures) mais pendant lesquels les bassins versants de montagne bénéficient encore de l'humectation des sols par la récente fonte de neige.
- ☞ Les épisodes généralisés d'automne (fin août, septembre, octobre) qui tombent sur un sol plus sec, mais avec des durées intenses plus longues et plus généralisées (6 à 18 heures). Ces événements ont des intensités plus fortes car la mer Méditerranée, dont ils sont originaires, est plus chaude à cette période de l'année.



Dans le Ritigraben (Valais, Suisse), le nombre d'événements de précipitations capables de déclencher des laves torrentielles a apparemment augmenté au cours des trois dernières décennies. Cependant les séries de précipitations disponibles sont journalières alors que pour une analyse plus précise, il serait souhaitable de recourir à des séries horaires de précipitations. En effet, l'intensité horaire est un paramètre important et, pour une valeur de pluie journalière donnée, la distribution des intensités horaires est très variable.

De nombreuses conjectures mettent en relation la dégradation des permafrosts et une augmentation de l'intensité et de la fréquence des laves torrentielles. Cette dégradation des matériaux gelés concernerait même le domaine périglaciaire<sup>8</sup> dans son ensemble. Le retrait glaciaire et la fonte du permafrost diminuent en effet la cohésion de matériaux déjà instables et peuvent potentiellement augmenter la fourniture en matériaux pour les écoulements torrentiels futurs.



<sup>8</sup> Zones où les alternances de gel/dégel et de couverture neigeuse jouent un rôle prédominant

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



### Impacts observés du changement climatique sur les laves torrentielles

#### Fréquence / intensité des laves torrentielles :

Malgré les nombreuses hypothèses qui proposent une augmentation de l'intensité des laves torrentielles comme conséquence du changement climatique, aucune tendance n'a été détectée ou modélisée. Les études disponibles font plutôt état d'une diminution globale de la fréquence des laves torrentielles. Ainsi, la fréquence des laves torrentielles en Valais suisse serait la plus limitée des 300 dernières années et une diminution significative du nombre de laves torrentielles a été observée depuis le milieu des années 1970 dans les Écrins et le Dévoluy (France).

L'évaluation de la fréquence d'événements de forte intensité, jugés « exceptionnels » lors de leur survenue (c'est particulièrement le cas pour le torrent du Ritigraben en Valais suisse en 1987 et 1993) a été remise en cause par des analyses ultérieures. Les premières analyses qui voyaient dans ces événements les prémices des effets du changement climatique ont été nuancées car de tels événements sont déjà survenus, avec des fréquences comparables, dans le passé.

**Saisonnalité des laves torrentielles :** Les laves torrentielles sont des événements plutôt estivaux, qui surviennent généralement entre le mois de juin et le mois d'octobre. Un décalage temporel a été observé au Ritigraben (Valais, Suisse) entre les périodes 1800-1950 et 1950-2000 : la saison des laves torrentielles s'est décalée de juin/juillet (liées à des orages localisés) vers août/septembre (dans le cadre de fortes précipitations régionales).

**Localisation des laves torrentielles :** Une élévation des zones de départ des laves torrentielles a été observée dans certains massifs, comme les Écrins où leur altitude est remontée de plus de 100 m entre 1952 et 2000. Les zones de départs situées en dessous de 1800 m sont restées inactives depuis 1976. En revanche, aucune variation n'a été observée à plus de 2 200 m d'altitude. L'augmentation des températures et la diminution du nombre de jours de gel (facteur d'éboulement par gélifraction) sont supposées expliquer ce décalage altitudinal. Une étude menée sur le Mont Rose, qui fait également état d'un décalage spatial vers des altitudes plus élevées, relie celui-ci au retrait glaciaire.

Mais à ce jour, aucun changement des caractéristiques des laves torrentielles, en lien avec la disponibilité en matériaux dans les zones périglaciaires, n'a été détectée. Au vu du faible nombre de sites surveillés, ceci ne veut pas dire pour autant que ces changements ne sont pas déjà survenus.



### Impacts potentiels du changement climatique sur les laves torrentielles

**Intensité des laves torrentielles :** Malgré le nombre important d'hypothèses proposant une augmentation de l'intensité dans un contexte de réchauffement climatique, aucune tendance n'a été modélisée. La disponibilité en matériaux est le facteur critique qui pourrait induire un changement futur local de l'intensité des laves torrentielles, avec des volumes et des distances d'arrêt plus importants. Même si l'évolution générale de l'intensité des laves torrentielles ne peut être évaluée, il est important pour les décideurs et les services techniques d'estimer l'évolution de certains sites, en fonction des enjeux exposés. En particulier, les risques liés au domaine périglaciaire pourraient potentiellement connaître une augmentation de l'intensité des événements (même si de tels changements n'ont pas encore été observés).

**Fréquence des laves torrentielles :** Les modélisations s'accordent assez bien avec les observations à basses et moyennes altitudes en simulant une diminution du nombre de laves torrentielles pour un climat plus chaud. Cependant, à l'échelle alpine, la fréquence des laves torrentielles pourrait augmenter dans certaines régions et diminuer dans d'autres en fonction des caractéristiques locales (altitude, présence de permafrost...).



**Saisonnalité des laves torrentielles :** Des hypothèses sont également proposées quant à l'évolution de l'activité des laves torrentielles si les précipitations venaient à augmenter pendant les périodes de transition (comme cela est suggéré par les modèles climatiques). Mais ce décalage des précipitations ne devrait pas avoir de répercussion car les températures moyennes pendant ces périodes de transition resteraient bien en deçà (entre 4°C à 7°C) des températures moyennes pendant la saison estivale. Les conditions climatiques seraient donc différentes et ne correspondraient donc pas forcément à une situation de déclenchement de laves torrentielles.

**Localisation des laves torrentielles :** Les zones de retrait glaciaire (moraines, talus d'éboulis) et de dégradation des permafrosts (démantèlement des glaciers rocheux...) sont supposées fournir des volumes importants de matériaux mobilisables pour de futures laves torrentielles. Moraines et talus d'éboulis, sont des milieux à même de fournir des matériaux pour des laves torrentielles, ainsi que certains glaciers rocheux en cours de démantèlement. Cette mobilisation pourrait survenir d'autant plus facilement si la pente est forte dans ces zones. Les espaces de haute montagne pourraient donc être plus propices aux laves torrentielles que par le passé.



## Avalanches – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

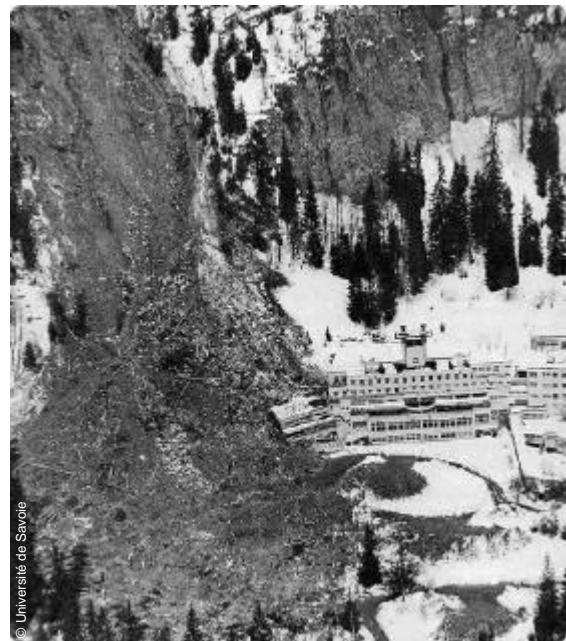
Une avalanche est un mouvement gravitaire rapide du manteau neigeux sur une pente, causé par une perte d'équilibre. En fonction de la dépose de la neige, de la température du sol, du couvert végétal, de la température et du taux d'humidité de l'air, ce mouvement peut survenir au niveau du sol (avalanche de neige lourde ou de plaque) ou sous forme d'aérosol. Ces types d'avalanches ont des caractéristiques de propagation différentes, qui induisent différents types de sollicitations sur les ouvrages, et auxquels répondent des moyens de protection différents.

### Données concernant les avalanches dans les Alpes

Les reconstructions historiques de l'activité avalancheuse sont réalisées à partir de récits des dommages, certaines chroniques remontant jusqu'au 16<sup>e</sup> siècle. Mais ce genre d'analyse ne permet pas de proposer une évolution de l'aléa naturel car les événements non catastrophiques ne sont pas répertoriés. Des techniques de dendrochronologie et de lichenométrie ont déjà été utilisées pour caractériser l'activité passée des avalanches dans un couloir précis.

Ces techniques ont également leurs limites : le nombre réduit d'études ne permet pas encore d'avoir une vision critique des méthodes utilisées et de croiser les résultats. Des problèmes de calage temporel des séries de données peuvent également se poser.

De plus, même si l'activité avalancheuse peut être reconstruite pour un couloir donné à partir de ces techniques, le lien avec des paramètres climatiques est malaisé à établir, si tant est qu'un lien puisse être établi, les auteurs sont obligés d'extrapoler des données météorologiques à partir de stations de mesure localisées parfois assez loin du lieu d'étude. L'observation des avalanches est compilée dans des atlas d'avalanche, documents qui sont souvent tenus par des services forestiers ou équivalents, dans l'arc alpin. Cette observation se fait à partir de couloirs identifiés sur des cartes. Les agents de terrain relèvent ensuite les caractéristiques de la coulée observée et les consignent dans des fiches qui constituent par la suite une base de données.



Des réseaux de coopération avec les stations de ski permettent également de fournir des informations sur les couloirs avalancheux dans le périmètre des domaines skiables ou à proximité. L'analyse de ces données ne permet toutefois pas de conclure quand à une évolution claire de l'aléa avalancheux et encore moins de la relier avec une évolution des caractéristiques climatiques.

Par contre ces données sont utilisées de manière opérationnelle par les stations de skis et les services météorologiques, notamment dans les pays anglo-saxons (États-Unis, Nouvelle Zélande, Canada...), pour évaluer le risque d'avalanche avec des méthodes probabilistiques de type « plus proche voisin ».

### Données concernant les avalanches en France

L'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) a commencé avant 1900 en Savoie et devient systématique dans les Alpes et les Pyrénées à partir de 1965, aboutissant à une base de données qui compte aujourd'hui plus de 80 000 événements répertoriés.

Cet exercice est longtemps resté tributaire des initiatives et de la disponibilité des personnels de l'Office National des Forêts (ONF) et plus spécialement des services Restauration des Terrains en Montagne (RTM). Néanmoins des chroniques assez exhaustives sont disponibles pour de nombreuses communes, en particulier après 1945.

Depuis 2002, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (aujourd'hui MEDAD) a souhaité régulariser cette situation (suivant en cela une recommandation du Retour d'Expérience consécutif à l'avalanche catastrophique de Montroc en 1999). Un protocole a été mis en place afin que l'observation se fasse toujours du même point, des repères sur les cartes permettent d'identifier des seuils limites d'observations, les périodes sans avalanches sont également renseignées.

Afin qu'il n'y ait pas d'amalgame avec des périodes sans observations, les observations sont assurées même pendant les vacances de poste ; toutes ces consignes font l'objet d'un manuel. Cette régularisation de l'observation des avalanches permet d'étudier de manière scientifique l'évolution de l'aléa avalancheux pour certains couloirs spécifiques.



Le réseau nivo-météorologique géré en partenariat par les stations de ski et Météo-France a été mis en place au début des années 1980. Ce réseau transmet quotidiennement des informations sur l'activité avalancheuse observée à proximité des stations de ski pendant la saison touristique. Ces données ne sont pas exhaustives ni d'un point de vue géographique, ni d'un point de vue temporel. Elles souffrent de lacunes lorsque les conditions météorologiques empêchent l'observation (brouillard par exemple).

Par ailleurs, comme les crues, les avalanches sont des phénomènes fortement surveillés (dans les sites sensibles) et de nombreuses mesures de prévention/protection existent. L'installation d'ouvrages de protection (râteliers, dents défectrices, digues...) ou des changements du couvert forestier ont, par exemple, des impacts très marqués sur l'activité avalancheuse. Ces mesures viennent « brouter » l'évolution des tendances naturelles de l'aléa en lui-même.



Ainsi, même si les informations fournies dans les bases de données sont précieuses, elles ne constituent pas pour autant une chronique systématique et instrumentale de tous les événements permettant d'effectuer une étude statistique complète de l'évolution de l'aléa. Il s'agit alors de choisir un échantillon de couloirs qui puisse être représentatif du massif à étudier. La difficulté de collecter des données avec un protocole standardisé (comme celui de l'EPA) est donc un problème crucial pour l'étude des avalanches. Des recherches visant à combler ces lacunes (détection automatique des avalanches par des capteurs sismiques ou par des images satellite par exemple) sont actuellement en cours, mais des limites techniques se posent également.

### Sensibilité des avalanches aux paramètres climatiques

Les situations avalancheuses, qui sont le fruit d'une situation météorologique extrême (fortes chutes de neige, redoux important) combinée à un manteau neigeux fourni, sont plutôt conditionnées par des facteurs météorologiques à très court terme (quelques jours), alors que les études climatiques se font plutôt sur des tendances à long terme et sur des moyennes.



Il est donc nécessaire de connaître l'évolution de l'occurrence de ces situations météorologiques extrêmes pour prévoir l'évolution de l'activité avalancheuse, mais la représentation des phénomènes extrêmes dans les modèles de climat est encore un sujet de recherches. Les approches de type « plus proche voisin » qui sont utilisées de manière opérationnelle pour l'évaluation du danger d'avalanche peuvent également être utilisées pour des approches probabilistes visant à associer des probabilités de déclenchement à une situation climatique donnée. Des études ont testé la corrélation potentielle de l'activité avalancheuse dans certains massifs avec des cycles climatiques tels que l'Oscillation Nord Atlantique, mais aucun lien n'a pu être trouvé.

En outre, il faut caractériser précisément l'évolution des conditions du manteau neigeux pour différentes tranches d'altitudes, correspondant aux zones de départ, aux couloirs et aux zones de dépôts. En effet, les caractéristiques des avalanches (distance d'arrêt, volume mobilisé,...) sont fortement conditionnées par le manteau neigeux. Toutes les avalanches sont par définition liées à la présence de neige et une possible réduction (en durée, en étendue ou en épaisseur) du couvert neigeux ou une remontée moyenne de la limite pluie/neige auront des impacts sur l'activité avalancheuse.

Selon le type d'avalanche considéré, d'autres paramètres entrent en ligne de compte. Si la propagation des aérosols de poudreuse est relativement indépendante de la topographie locale, celle des avalanches de neige humide ou de plaques est sensible au relief, au couvert forestier et à la sensibilité de la zone à l'érosion.

Tous ces facteurs ne permettent donc pas de relier directement l'activité avalancheuse aux conditions climatiques d'une part, et aux conditions neigeuses d'autre part. Et bien que l'on dispose d'observations correctes de l'évolution du manteau neigeux avec des tendances claires et des modélisations diverses (dans un contexte de réchauffement climatique), ces données ne sont pas suffisantes pour une évaluation de l'évolution potentielle de l'aléa avalanche. Des conjectures peuvent être proposées mais elles se heurtent aux limites mentionnées précédemment.

On ne dispose en effet pas aujourd'hui de modèles complets qui prennent en compte les facteurs de prédisposition, le déclenchement et la propagation des avalanches.

Pour contourner ces limites, Météo-France a développé en 2001 une approche basée sur la chaîne de modélisation SAFRAN-CROCUS-MEPRA, utilisée de manière opérationnelle pour diagnostiquer la stabilité du manteau neigeux sur une pente à partir des conditions météorologiques analysées et prévues. Grâce à cet outil, il est possible de tester la sensibilité du manteau neigeux à une évolution des paramètres météorologiques, telle qu'une augmentation de la température de l'air ou des précipitations par exemple. Par ailleurs, le Cemagref dispose d'outils numériques pour le calcul d'écoulement des avalanches.

## Impacts observés du changement climatique sur les avalanches

Le climat ne semble pas avoir évolué de manière suffisante pour influencer sur l'activité avalancheuse. D'ailleurs, aucune tendance n'a pu être observée que ce soit en terme de fréquence ou de localisation des avalanches dans les Alpes. Les études sur ce sujet restent cependant limitées : d'une part, les données disponibles sont relativement peu nombreuses et d'autre part toutes les pistes d'analyse n'ont pas été explorées. L'intensité et la saisonnalité sont notamment les facteurs les moins étudiés ; il apparaît donc difficile de proposer des conclusions pour ces paramètres.

Les situations avalancheuses catastrophiques telle que celle qui a frappé les Alpes en 1999 sont la conséquence de chutes de neige extrêmes. Dans les conditions climatiques actuelles, de telles situations se rencontrent environ tous les dix ans et il ne semble pas y avoir eu de changement concernant ce type de situations.



## Impacts potentiels du changement climatique sur les avalanches

De nombreuses conjectures existent quant à l'évolution des avalanches. Certains auteurs prédisent une augmentation potentielle des avalanches de neige humide à cause de périodes de redoux et d'une limite pluie/neige plus élevée en altitude. Mais ils supposent également que, ramenés à la moyenne annuelle, ces changements seraient à peine perceptibles. D'autres hypothèses proposent que l'activité avalancheuse serait réduite à basse et moyenne altitude en raison d'une diminution de la couverture neigeuse alors qu'elle pourrait augmenter à haute altitude (> 2 500 m), à cause d'une augmentation attendue des précipitations (sous forme de neige).



L'étude de Météo-France menée en 2001 montre que la stabilité du manteau neigeux aurait tendance à augmenter lorsque le climat se réchauffe, la fraction d'instabilités de type « neige fraîche » ayant tendance à diminuer (en raison notamment de la remontée de la limite pluie/neige). Des résultats préliminaires du Cemagref vont dans le sens de cette hypothèse. Il semblerait que l'altitude d'arrêt des avalanches référencées dans l'EPA soit remontée en altitude sur les 30 dernières années. Cette propagation réduite s'explique par un plus grand nombre d'avalanches de neige humide et un moins grand nombre d'avalanches de neige sèche.

Au final, il apparaît donc difficile de dresser une esquisse globale de l'évolution de l'activité avalancheuse en terme d'intensité, de fréquence, de localisation et de saisonnalité par rapport au changement climatique. Des conjectures dans une perspective de changements climatiques ont été proposées mais les évolutions supposées sont difficilement quantifiables et décelables à l'aide des données actuellement disponibles. Un plus grand nombre d'avalanches de neige humide et une diminution de l'activité avalancheuse aux basses et moyennes altitudes sont les deux hypothèses les plus probables au vu des connaissances actuelles.

Plusieurs pistes sont cependant explorées pour progresser sur ce thème : amélioration des observations, développement de méthodes statistiques dédiées pour analyser les données actuelles, développement d'outils numériques permettant de mieux caractériser l'activité avalancheuse et le lien avec les paramètres météorologiques, régionalisation des scénarios climatiques en zone de montagne.



## Mouvements de terrain – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

Un mouvement de terrain est un mouvement gravitaire plus ou moins brutal du sol, qui dépend notamment de la nature des terrains, de la structure géologique et des pressions hydrauliques souterraines. Ces mouvements sont dus à des processus d'altération et d'érosion mécanique, de différentes natures : cycles de gel/dégel, érosion par l'eau. Les activités humaines peuvent également avoir une influence sur les mouvements superficiels quand elles modifient la susceptibilité des sols (labours...) ou même sur des mouvements plus profonds dans certains cas particulier (concentration des eaux de drainage, cavités souterraines, minages...). Dans ce rapport, les différents types de mouvements de terrain considérés sont les mouvements superficiels, les mouvements profonds et les chutes de rochers.

### Données concernant les mouvements de terrain dans les Alpes

Il existe de nombreuses bases de données qui répertorient des épisodes de mouvements de terrain. En France, il s'agit notamment de la BDMvt, maintenue par le Bureau des Risques Géologiques et Miniers (BRGM) avec la contribution des services RTM et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (CETE/LCPC). Pour chaque fiche, les coordonnées du mouvement, sa localisation administrative, la date, les caractéristiques des mouvements (glissements, chutes de blocs/éboulements, coulée, etc.), le volume, la largeur du glissement et les dommages occasionnés sont renseignés. Cependant tous les paramètres qui peuvent

conduire à ces mouvements (géologiques, pluviométriques, chimiques, etc.) ne sont pas renseignés. La BD-RTM quant à elle est alimentée à partir des observations des agents forestiers travaillant sur les terrains domaniaux, de l'État ou des communes. Cette base de données RTM regroupe les observations d'avalanches, érosion-ravinement, crues des torrents et rivières torrentielles, mouvements de terrain pour les 11 départements des Alpes et des Pyrénées.



Dans ces bases, seuls les événements ayant causé des dégâts sont en général recensés, à la différence d'inventaires instrumentaux systématiques (comme les enregistrements des réseaux de surveillance sismique par exemple). Ces bases sont donc influencées par l'évolution de la vulnérabilité et ne peuvent donc pas être utilisées directement pour évaluer l'évolution de l'aléa. De tels renseignements ne sont disponibles que pour des sites expérimentaux, surveillés par des laboratoires ou des observatoires, avec une couverture géographique très limitée. Une extrapolation des données disponibles à un territoire plus vaste n'est donc guère possible.

Des méthodes dendromorphologiques sont utilisées pour reconstruire l'activité passée des chutes de blocs à partir des traces laissées par les rochers sur les arbres au moment de l'impact. Ce genre de procédé est encore au stade expérimental et de nombreuses limites se posent : il est possible que des rochers impactent un seul arbre pendant leur chute, ou plusieurs arbres ou pas du tout. Ceci est impossible à déterminer et les chercheurs partent du postulat « qu'un impact correspond à un événement de chute de rocher ».

Les impacts peuvent laisser des traces comme des cicatrices ou des « traumatismes » dans les conduits de résine, mais ces traces ne sont pas toujours décelables. Ces méthodes s'intéressent également aux corrélations existant entre le climat et ces mouvements de terrain. Mais, les calculs de corrélation avec les paramètres climatiques sont réalisés pour des postes météorologiques éloignés de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, etc. Les limites sont donc très nombreuses et les résultats proposés par de telles études doivent être considéré comme exploratoires et non comme acquis.



## Mouvement de terrain / Glissements de terrain superficiels – Observations et projections dans un contexte de changements climatiques

### Définition

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

### Sensibilité des mouvements superficiels aux paramètres climatiques

Un accroissement des précipitations intenses est à même de provoquer une recrudescence des glissements superficiels, qui sont souvent dus à des pics de pressions interstitielles. Cette réponse dépendra des caractéristiques d'infiltration propres à chaque site.

Les glissements superficiels peuvent être également modifiés indirectement par les changements climatiques, par l'intermédiaire des conséquences sur les glaciers, les permafrosts ou encore les feux de forêts. Le retrait glaciaire et la dégradation des permafrosts vont laisser de vastes surfaces de versants dans des conditions instables (principalement à cause de la perte de cohésion due au dégel des particules de glace dans ces versants). Ces volumes de matériaux sont potentiellement mobilisables sous forme de coulées de boue en altitude et ce d'autant plus si la pente présente une forte déclivité.

En cas d'augmentation des températures, des hypothèses font également état d'une possible recolonisation des talus d'éboulis à cause de périodes végétatives plus longues. La revégétalisation améliorerait la cohésion de ces versants. Cette stabilisation par la revégétalisation pourrait cependant être freinée par l'arrivée d'espèces acidifiantes comme de la famille des Ericaceae s.l. (comme les myrtilles ou les bruyères) sur des sols de pelouses, qui risquent de limiter l'implantation d'autres espèces au système racinaire plus développé. Les conditions climatiques sont très difficiles à haute altitude pour la croissance des végétaux ; la revégétalisation dans ces conditions peut être très lente.



Après un feu de forêt, le sol perd une grande partie de sa protection qui était auparavant assurée par le couvert végétal. De plus, la présence de particules fines telles que les cendres et les charbons peut avoir un rôle de lubrifiant et favoriser l'érosion de surface. Toutes ces conditions aggravent le caractère agressif des fortes précipitations sur ces sols et peuvent faciliter des coulées de boue superficielles. La multiplication des feux de forêts (plausible dans un contexte de réchauffement) est donc un facteur aggravant supplémentaire pour le déclenchement de glissements superficiels.

Ce type de phénomène aggravant a, par exemple, été observé après l'incendie du 6 juillet 1982 dans le massif de Chamatte (Alpes-de-Haute-Provence, France). Le 18 juillet, un orage a réactivé des ravins considérés comme éteints et provoqué des coulées de boues sur le village d'Angle. Cependant, cette détérioration de l'état du sol n'est que temporaire et après quelques années, la végétation recolonise ces terrains et son rôle de protection fait effet à nouveau.

### **Impacts observés du changement climatique sur les glissements superficiels**

En Romandie et dans le canton du Tessin (Suisse) ont été observées des augmentations concomitantes du nombre de glissements de terrain et des précipitations depuis deux décennies, ce qui suggère un lien. Mais la littérature disponible ne fournit aucune analyse d'impact direct observé du changement climatique sur les glissements superficiels. Cependant, des impacts indirects via les feux de forêts et les tempêtes sont souvent mentionnés et observés localement, bien que ces observations soient limitées dans le temps et l'espace. Ainsi, malgré le manque de tendances significatives, ces impacts indirects doivent être considérés comme des risques potentiels émergents.



## Impacts potentiels du changement climatique sur les glissements superficiels

**Intensité des glissements superficiels :** Des hypothèses proposent qu'une dégradation des permafrosts et un retrait glaciaire marqué puissent augmenter l'intensité des glissements superficiels de type coulée de boue (par le biais d'une augmentation des volumes de matériaux mobilisables). Même si ces hypothèses sont plausibles, elles n'ont pas été confirmées ou infirmées pour l'instant dans les Alpes et ne concernent que les hautes altitudes.

**Fréquence des glissements superficiels :** Les hypothèses développées dans le chapitre sur l'intensité (basées sur le retrait glaciaire et la dégradation des permafrosts) sont également avancées pour la fréquence des phénomènes en haute altitude. A ces hypothèses vient s'ajouter à basse et moyenne altitude celle liée à la multiplication des feux de forêts qui déstabilisent les couches superficielles du sol. En combinant ces dégradations des sols et une augmentation attendue des précipitations à certaines périodes de l'année, les chercheurs prévoient une multiplication des glissements superficiels. La (re)végétalisation progressive des versants (dépôts morainiques, talus d'éboulis, chaos rocheux, etc.) pourrait diminuer la fréquence des instabilités en améliorant la cohésion des matériaux. Il n'existe toutefois pas d'observation qui vienne corroborer cette hypothèse pour l'instant.



## Mouvement de terrain / Glissements de terrain profonds – Observations et projections dans un contexte de changement climatique

### Définition

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

### Sensibilité des mouvements profonds aux paramètres climatiques

Les précipitations annuelles et même les moyennes pluriannuelles sont présentées par différents chercheurs comme étant le paramètre-clé pour l'évolution des glissements profonds, à travers leur influence sur l'infiltration profonde et les eaux souterraines. Une modification marquée de la pluviométrie annuelle pourrait donc avoir des conséquences sur l'activité des glissements profonds. Cas particulier : les versants dont la stabilité est contrôlée par un phénomène d'érosion en pied sembleraient être plus sensibles à l'évolution des écoulements de surface liés aux précipitations intenses.

A l'échelle des temps géologiques, une étude dendrochronologique a établi une relation entre climat et activité des glissements dans les Préalpes fribourgeoises (ex : Hohberg et Falli-Höllli) où des périodes chaudes ont conduit à une recrudescence de glissements profonds pour des zones de flysch en dessous de 1 500 m. Cette réactivation semble être liée à la position de l'isotherme 0°C. Mais ces liens entre des périodes chaudes et une activité des glissements profonds plus marquée ne peuvent être généralisés à l'ensemble des Alpes.

## Impacts observés du changement climatique sur les glissements profonds

Aucun impact observé du changement climatique actuel sur les glissements profonds n'est actuellement disponible dans la littérature traitée.

## Impacts potentiels du changement climatique sur les glissements profonds

**Intensité des glissements profonds** : Chaque glissement profond a ses caractéristiques propres (topographie, hydrogéologie, végétation, etc.). Certains pourraient réagir à une augmentation des précipitations par une accélération de leurs mouvements. Cette réaction ne serait toutefois pas systématique et dépendrait fortement du contexte local.

**Fréquence des glissements profonds** : Pour les mouvements qui sont sensibles aux paramètres météorologiques à court terme, on peut s'attendre à une augmentation de la fréquence des phases d'accélération, en lien avec l'augmentation supposée des précipitations intenses.

**Localisation des glissements profonds** : Suite à des conditions climatiques nouvelles et plus particulièrement à un changement des régimes de précipitations, il est plus probable d'assister à une réactivation d'anciens glissements profonds plutôt qu'à une activation de nouveaux glissements profonds.



## Mouvement de terrain / Chutes de rochers – Observations et projections dans un contexte de changement climatique

### Définition

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

### Sensibilité des chutes de rochers aux paramètres climatiques

Des corrélations positives entre les éboulements ou les chutes de blocs et les jours affectés par des cycles de gel/dégel ont pu être mises en évidence. Par contre, le lien avec les précipitations n'est pas établi.



En France, une étude menée sur un total de 46 chutes des rochers dans les massifs de Chartreuse et du Vercors n'a montré aucune corrélation entre ces chutes et les précipitations ; par contre une corrélation a été démontrée pour les jours avec des épisodes de gel/dégel.



Pendant l'été caniculaire de 2003, de nombreuses chutes de rochers ont été observées en haute montagne. L'interprétation généralement avancée est que cette recrudescence de chutes de pierres et de blocs est due à une dégradation importante du permafrost à cause de températures très élevées. La profondeur de dégel du permafrost pendant cet épisode de canicule a excédé de 10 centimètres à 50 cm les moyennes des 20 années précédentes. Il est cependant intéressant de noter que ces instabilités se sont manifestées entre juin et août ; c'est-à-dire non pas quand le phénomène de fonte était le plus profond mais quand les flux de chaleur dans les couches superficielles étaient maximaux.

De nombreuses études font l'hypothèse d'un lien entre une dégradation du permafrost en paroi et l'activité des chutes de blocs. Cette dégradation du permafrost pourrait avoir des conséquences à la fois sur l'intensité, la fréquence, la saisonnalité et la localisation des phénomènes.

Après la réponse immédiate des couches de surface [du permafrost] aux températures plus élevées, la limite inférieure du permafrost pourrait remonter en altitude et de nombreuses instabilités pourraient se développer à des altitudes qui ne sont généralement pas beaucoup affectées par des phénomènes de gel/dégel. En effet, la pénétration de fronts de gel dans des matériaux qui avaient précédemment dégelé amène des contraintes importantes, de par la formation de glace dans les fissures, et peut favoriser le déclenchement de chutes de rochers.

La disparition de la forêt et du couvert végétal après un feu de forêt a des conséquences potentielles sur le départ de chutes de blocs (contraintes thermiques et moindre maintien par les racines) et sur leurs distances d'arrêt (diminution du rôle d'écran protecteur des forêts) : une multiplication des feux de forêts (probable dans un contexte de réchauffement climatique) serait donc un facteur aggravant pour l'évolution du phénomène.

Ces conséquences négatives ont notamment été observées après le feu de l'Argentière-la-Bessée (2003, Hautes-Alpes, France), du Néron (2003, Isère, France) et de Pont en Royans (2003, Isère, France).



## Impacts observés du changement climatique sur les chutes de rochers

**Intensité des chutes de rochers :** Une étude utilisant des techniques de dendrochronologie dans les Pré-Alpes suisses n'a pas montré d'évolution de l'intensité des chutes de rochers dans ces territoires.

**Fréquence des chutes de rochers :** La fréquence des chutes de rochers semble avoir augmenté dans les Préalpes suisses au cours du 20<sup>e</sup> siècle. De nombreuses chutes de rochers ont également été observées pendant la canicule 2003. Les données sont toutefois insuffisantes pour préciser si la fréquence de ces phénomènes pendant cet été caniculaire a été plus élevée que pendant un été « normal ». Une étude statistique a montré que la probabilité d'occurrence des chutes de rochers les jours où il y a des phénomènes de gel/dégel est 2.5 fois plus élevé que les jours sans phénomène de gel/dégel (valeur estimée pour les massifs de Chartreuse et Vercors, France).

**Localisation des chutes de rochers :** Pendant la canicule 2003, des chutes de rochers plus nombreuses ont été observées dans les faces Nord des montagnes alpines. Cette fréquence accrue dans les ubacs peut s'expliquer par la présence plus importante de permafrost dans ces pentes exposées Nord. Une étude menée sur le Mont Rose (Valais, Suisse) a mise en évidence un décalage spatial avec une remontée en altitude des zones de départ. Ce décalage a été expliqué (comme pour les laves torrentielles) par le retrait du domaine périglaciaire.

## Impacts potentiels du changement climatique sur les chutes de rochers

**Intensité des chutes de rochers :** Des hypothèses relient la dégradation des permafrosts avec une augmentation future de l'intensité du phénomène de chutes de rochers. Même s'il est clair qu'un dégel des permafrosts aura des conséquences sur les chutes de rochers, et ce plus particulièrement dans les falaises rocheuses, il est difficile de prévoir l'évolution des volumes mobilisés.

**Fréquence des chutes de rochers :** Les hypothèses à propos de l'évolution des chutes de rochers prévoient une augmentation de leur fréquence dans les zones de permafrosts ou dans les zones soumises aux phénomènes de gel/dégel, ainsi qu'une diminution dans les zones d'altitudes moins élevées.



## Risques glaciaires – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

Terme générique regroupant tous les types de risques qui ont pour origine les glaciers, les poches d'eau et les lacs associés.

### Données concernant les risques glaciaires

La dernière catastrophe glaciaire majeure dans les Alpes remonte à 1965, en Suisse, avec l'effondrement de la partie terminale du glacier d'Allalin (Valais, Suisse) sur le chantier du barrage du Mattmark. Comme il y a eu peu de catastrophes glaciaires pendant la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle, l'attention s'est quelque peu détournée de ces phénomènes. Cependant, des situations potentielles de catastrophes glaciaires existaient dans les Alpes au cours des dernières années, comme le lac proglaciaire d'Arsine (Hautes-Alpes, France), le lac supraglaciaire de Rochemelon (Savoie, France) ou le Lago Effimero sur le glacier du Belvédère (Piémont, Italie).

Le programme GLACIORISK (2001-2003) avait pour objectif de réaliser une base de données homogène des risques glaciaires en Europe. Cette base de données propose des fiches de renseignements pour 166 glaciers alpins considérés comme « à risque » et localisés en France, Suisse, Autriche et Italie. Les caractéristiques du glacier (longueur, altitude, type, surface, pente, orientation et localisation) sont détaillées ainsi que les événements glaciaires qui y sont déjà survenus.

Mais tous les événements glaciaires ne sont pas renseignés et la qualité des informations n'est pas homogène pour toutes les fiches ; certaines observations ont été faites par des services techniques, d'autres sont assez anciennes et basées sur des témoignages divers. Cette base de données, unique pour ce qui est des risques glaciaires, ne permet donc pas d'évaluer une évolution des aléas glaciaires.

Les poches d'eau intraglaciaires ne sont pas observables. Malgré quelques tentatives de télédétection, il n'existe pas de données pour cet aléa.



Les lacs glaciaires et les chutes de séracs font par contre l'objet d'observations ponctuelles par des laboratoires, comme le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE) français ou le Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) suisse, sur des sites expérimentaux (qui peuvent correspondre à des sites à risques). Ces observations ponctuelles permettent de déterminer des modèles (notamment un modèle de prévision des chutes de séracs avec une précision de une à deux semaines) et des tendances pour des cas particuliers, mais il n'est pas réellement possible de dégager des tendances générales.

## Risques glaciaires / Vidange de lac glaciaire – Observations et projections dans un contexte de changement climatique

### Définition

Lorsque le front du glacier avance ou recule, des retenues naturelles (essentiellement des moraines) peuvent se former et mener à la formation de lacs. Comme ces barrages naturels sont fait de matériaux hétérogènes avec une cohésion limitée, ils peuvent facilement se rompre, déclenchant des inondations significatives et des laves torrentielles en aval. Ces lacs peuvent se former au front du glacier (lac proglaciaire), à la surface du glacier (lac supraglaciaire), entre le glacier et le versant (lac de gouttière) ou à la confluence de deux glaciers (lac de confluence). Le terme GLOF (Glacial Lake Outburst Flooding) est souvent utilisé pour nommer les dangers liés aux lacs glaciaires.

### Sensibilité des lacs glaciaires aux paramètres climatiques

Les conditions climatiques et la dynamique des glaciers expliquent la formation des lacs glaciaires. La formation de lacs proglaciaires est fortement corrélée au retrait des glaciers, avec plusieurs typologies possibles. Lorsque le front du glacier recule, des barrages morainiques peuvent se former, souvent constitués de matériaux instables avec une cohésion limitée. De plus, certaines de ces digues peuvent également comporter du permafrost. Les surcreusements vidés de glace après le recul du glacier peuvent également se remplir de l'eau de fonte et des précipitations pour devenir des lacs. Enfin, des lacs pro-glaciaires peuvent aussi se former derrière des verrous glaciaires, comme c'est le cas au glacier du Rhône (Valais, Suisse).

Si la rupture de digue des lacs glaciaires est à craindre dans les deux premiers cas de figure, elle ne l'est pas pour les lacs retenus par un verrou glaciaire.



Les lacs supraglaciaires peuvent également être la conséquence de la dynamique des glaciers, comme le lac du Belvédère (Piémont, Italie) en 2002 qui serait notamment dû à une avancée marquée du glacier depuis 2009. Les conditions climatiques peuvent également concourir à la formation et l'extension des lacs supraglaciaires. Les lacs supraglaciaires demandent à être étudiés davantage, aussi bien pour préciser leurs conditions de formation que les moyens de les vidanger (il y avait une forte incertitude pendant la vidange du lac de Rochemelon quant à la réaction du chenal de glace).

<sup>9</sup> Même si le recul glaciaire est généralisé, certains glaciers peuvent malgré tout être en crue (c'est-à-dire que ces glaciers « avancent »).

Des chutes de séracs dans un lac glaciaire peuvent créer des vagues (comme la vague de cinquante centimètres survenue le 14/07/1996 au lac proglaciaire d'Arsine, suite à une chute de sérac). Ces vagues peuvent potentiellement provoquer la rupture des digues morainiques. Les recherches sur la stabilité des moraines quand elles jouent le rôle d'une digue demandent également à être développées.



### **Impacts observés du changement climatique sur les vidanges de lacs glaciaires**

Aucun impact du changement climatique sur les vidanges de lacs glaciaires n'est actuellement disponible dans la littérature traitée.

### **Impacts potentiels du changement climatique sur les vidanges de lacs glaciaires**

Des hypothèses proposent qu'un réchauffement du climat (avec comme conséquences des précipitations intenses en altitude et un retrait glaciaire accéléré) pourrait conduire à une augmentation potentielle de la formation de tous les lacs glaciaires, sans distinction. Ces conjectures restent peu argumentées car l'influence des conditions climatiques sur la formation des lacs supraglaciaires, des lacs de gouttière et des lacs de confluence n'est pas claire.

Seule l'augmentation à venir du nombre des lacs proglaciaires, en lien avec un recul marqué des glaciers, est établie.



## Risques glaciaires / Poches d'eau glaciaires – Observations et projections dans un contexte de changement climatique

### Définition

Les poches d'eau glaciaires peuvent être soit intraglaciaires (c'est-à-dire dans l'épaisseur du glacier), soit subglaciaires (c'est-à-dire entre le glacier et le socle rocheux, cf. fig. 27). Les conditions de formation et de rupture des poches d'eau sont méconnues. Cependant, il semblerait que les poches d'eau sub-glaciaires se forment souvent au niveau d'un ressaut morphologique.

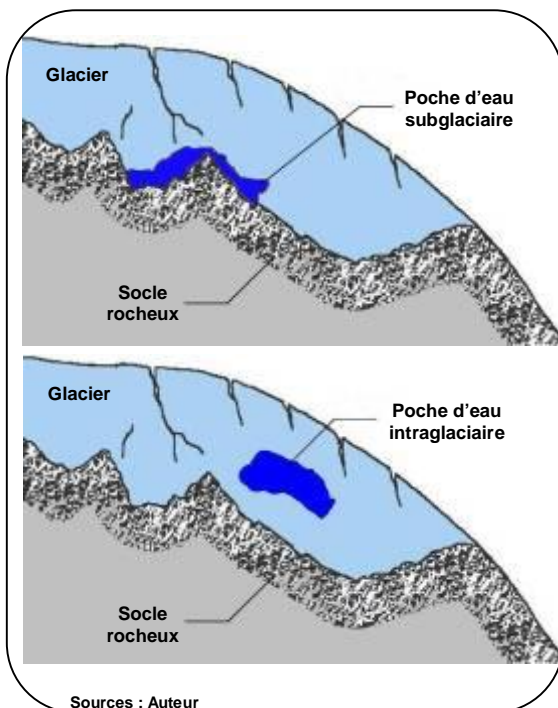


Fig. 27 – Représentation schématique de poches d'eau glaciaires

### Sensibilité des poches d'eau glaciaires aux paramètres climatiques

Les mécanismes qui régissent la formation et la rupture des poches d'eau glaciaires (intraglaciaires ou subglaciaires) sont actuellement inconnus. Les écoulements d'eau liquide à l'intérieur des glaciers sont également très mal connus.

Dans le massif du Mont Blanc, des lâchers d'eau ou leurs traces ont été observés sur le glacier du Trient, le glacier de Tête Rousse en 1995 et la Mer de Glace.

Ces observations ne sont pas reliées à des causes clairement identifiées. Il peut s'agir aussi bien d'une fonte accélérée de certaines parties du glacier, de ruptures de poches d'eau de petits volumes, de l'écoulement de précipitations abondantes ou encore de phénomènes d'écoulements intraglaciaires inconnus. Face à cette absence de connaissances, l'évolution des poches d'eau glaciaire dans un contexte de réchauffement climatique est tout simplement impossible à évaluer.

### Impacts observés et potentiels du changement climatique sur les vidanges de poches d'eau glaciaires

Considérant les limites mentionnées précédemment, il est impossible d'évaluer l'évolution des poches d'eau glaciaires (avec ou sans changement climatique).



## Risques glaciaires / Chutes de séracs – Observations et projections dans un contexte de changement climatique

### Définition

On appelle chutes de séracs (parfois appelées « avalanche de glace ») la chute de blocs de glace se détachant du glacier et tombant dans la pente en aval, se fracturant en plus petits blocs. Dans certains cas extrêmes, c'est la langue terminale du glacier dans son ensemble qui se détache.

### Sensibilité des chutes de séracs aux paramètres climatiques

Les chutes de séracs sont des phénomènes relativement fréquents pour les glaciers et font partie de l'ablation naturelle de ces derniers, et plus particulièrement pour les glaciers suspendus. Le lien avec les conditions climatiques est indirect, car il s'agit avant tout de mouvements influencés par la dynamique du glacier qui est elle-même influencée par les paramètres climatiques. Un glacier avec une dynamique forte présente des chutes de séracs plus fréquentes. Mais un réchauffement entraînerait en général une augmentation de l'ablation et une diminution de l'accumulation (sauf peut-être à très haute altitude où l'hypothèse d'une prédominance de l'augmentation des précipitations subsiste). Ceci aurait pour conséquence des bilans de masse négatifs.

Le débit des glaciers devrait donc diminuer, à long terme, de même que le débit des séracs. L'évolution pour les 20 à 30 prochaines années reste, par contre, très incertaine. Dans certains cas extrêmes, c'est une partie de la langue terminale qui peut se détacher du glacier et dévaler la pente. Ce genre de phénomène est survenu, par exemple, en 1949 au glacier du Tour (Haute-Savoie, France) et en 1965 au glacier d'Allalin. Les glaciers suspendus peuvent également se « décrocher » de leur site d'ancrage. Le passage d'un mode « froid » (le glacier adhère au socle rocheux grâce aux températures basses de sa base) à un mode « tempéré » (de nombreux écoulements liquides peuvent alors lubrifier la base du glacier) serait la principale influence du changement climatique sur les glaciers suspendus et leur stabilité. Ceci est d'autant plus inquiétant qu'un réchauffement des glaciers froids situés aux hautes altitudes a été mis en évidence dans les Alpes (notamment au Col du Dôme du Goûter, voir le chapitre « glacier » de ce rapport. Des sites « à risque » sont déjà identifiés : Dôme du Goûter et glacier de Tacconnaz (Haute-Savoie, France) où les chutes de séracs sur un manteau neigeux épais provoquent des avalanches ; Grandes Jorasses (Aoste, Italie) ou encore Randa/Weisshorn (Valais, Suisse).



## Impacts observés du changement climatique sur les chutes de séracs

**Localisation des chutes de séracs :** Une étude menée sur le Mont Rose (Valais, Suisse) a montré que de nouvelles zones de détachement de séracs s'étaient développées, à des altitudes plus élevées qu'auparavant. Ce rapport étant la seule source sur un décalage spatial des zones de départ de chutes de séracs, il est prématuré de vouloir proposer des conclusions générales.

## Impacts potentiels du changement climatique sur les chutes de séracs

**Fréquence et intensité des chutes de séracs :** Les chutes de séracs ne devraient pas être plus fréquentes qu'auparavant. Il y a peu d'observations directes de ces phénomènes et les propositions sur une évolution de cet aléa sont uniquement des hypothèses. Même si une augmentation passagère de la fréquence des chutes de séracs peut être extrapolée, la diminution du volume des glaciers et leur remontée en altitude devraient atténuer cette augmentation. Cependant, comme mentionné précédemment, le danger pourrait venir des glaciers suspendus. Si ces glaciers passent d'un mode froid à un mode tempéré, il pourrait y avoir une augmentation des fréquences des chutes de séracs, mais surtout des volumes de chaque événement, voire même des chutes de portions importantes de glaciers suspendus.





## Tempêtes – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

On parle de tempête lorsque les vents dépassent les 89 km/h (soit le degré 10 de l'échelle de Beaufort). La plupart des tempêtes qui touchent l'Europe se forment au-dessus de l'Atlantique, entre 35° et 70° de latitude Nord. Ces tempêtes surviennent principalement en hiver et en automne pour l'Europe (notamment entre novembre et février).

### Données concernant les tempêtes

En France, il n'existe pas d'inventaire exhaustif sur les tempêtes qui remonte à plusieurs siècles, les réseaux anémométriques datant du début du 20<sup>e</sup> siècle. Il est cependant possible d'utiliser les données de pression de l'air, qui sont disponibles depuis la fin du 18<sup>e</sup> siècle pour une trentaine de stations, pour extrapoler l'activité des tempêtes. Les événements exceptionnels qui induisent des dégâts importants sont par ailleurs bien renseignés. Mais ces événements extrêmes ponctuels ne permettent pas une analyse fine des causes des tempêtes et de leur évolution.



### Sensibilité des tempêtes aux paramètres climatiques

L'influence du climat et des changements climatiques sur la cyclogenèse et la formation des tempêtes est moyennement connue. La formation des tempêtes est fortement liée à l'instabilité barocline (qui est prépondérante dans la formation des dépressions). Par contre le lien entre l'ONA et les tempêtes est flou.



### Impacts observés des changements climatiques sur les tempêtes

**Intensité des tempêtes :** Il n'y a pas de tendance significative d'évolution de l'intensité des tempêtes en France entre 1950 et 2000.

**Fréquence des tempêtes :** Il y a eu une légère augmentation de la fréquence des tempêtes sur l'Atlantique Nord au cours du 20<sup>e</sup> siècle, mais l'intensité de ces événements est restée inchangée. En France, une quinzaine de tempêtes surviennent chaque année (variabilité interannuelle très forte : 26 événements en 1962 contre 7 en 1968). Une sur dix en moyenne est considérée comme « forte » (c'est-à-dire qu'au moins 20 % des stations départementales enregistrent un vent maximal instantané supérieur à 100 km/h).

Il y a eu une légère diminution (non significative) de la fréquence des tempêtes entre 1950 et 2000 (cf. Fig 28).

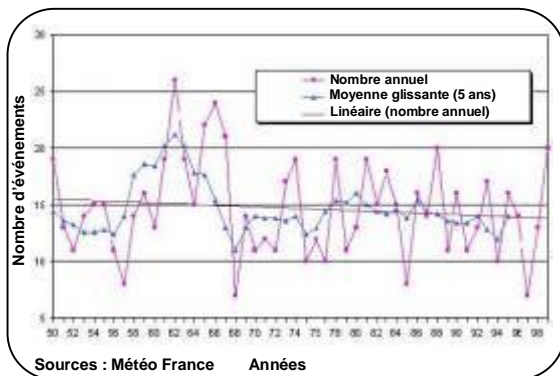


Fig. 28 – Nombre annuel de tempêtes en France entre 1950 et 1999

## Impacts potentiels des changements climatiques sur les tempêtes

**Intensité des tempêtes :** L'augmentation de la concentration en vapeur d'eau pourrait soit favoriser la condensation de la vapeur d'eau lors de la formation des nuages et des pluies, ou au contraire, rendre plus efficace le transport d'énergie des tempêtes vers les hautes latitudes. Les hypothèses sont donc contradictoires pour l'évolution de l'intensité des tempêtes.

**Fréquence des tempêtes :** Le réchauffement de l'atmosphère peut avoir des conséquences opposées, avec un gradient thermique sud-nord augmenté ou diminué (en fonction du réchauffement de la haute ou de la basse atmosphère) et donc une fréquence des tempêtes augmentée ou diminuée.

## Feux de forêts – observations et projections dans un contexte de variations climatiques

### Définition

Les feux de forêts sont des incendies déclenchés dans des zones de forêts ou de végétation arbustive et qui se propagent sur au moins un hectare. Les zones de forêts sont des formations végétales, organisées ou spontanées où des arbres d'âges et de densités variés dominent. Les zones arbustives sont constituées d'arbustes et de buissons.



### Données concernant les feux de forêts

Depuis 1973, la base de données « Prométhée » référence pour les 15 départements du sud de la France les feux de forêts survenus dans des espaces forestiers ou agricoles. La localisation, la date et la surface du feu sont toujours indiquées. Pour les feux les plus importants, plus de détails sont répertoriés, comme le type de végétation et de couvert forestier, les véhicules et les moyens utilisés, les modes de propagations, etc. Les Alpes ne sont pas vraiment couvertes par cette base, à l'exception des parties les plus méridionales de la chaîne. Cependant, depuis la canicule de 2003 et les feux de forêts consécutifs, les SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) ont mis

en place une base de données pour certains départements alpins (notamment l'Isère), sur le même schéma que la base « Prométhée ». Le but principal de la base « SDIS » est d'améliorer l'efficacité des services d'urgence à travers des retours d'expérience. Elle peut toutefois également être utilisée pour évaluer l'évolution des feux de forêts en fonction des paramètres climatiques. En revanche, le fait que cet outil ait été développé après 2003 ne permet pas d'analyser des événements sur le long terme. Une période d'observation plus longue est donc nécessaire pour une approche scientifique.



### Sensibilité des feux de forêts aux paramètres climatiques

Les feux de forêts sont liés au climat à travers de nombreux paramètres directs et indirects. La dynamique des feux de forêts est fortement influencée par le climat, qui détermine les conditions de prédisposition au feu : températures moyennes et extrêmes, quantité et fréquence des précipitations, intensité, direction, durée et type de vent, durée d'ensoleillement. Une étude scientifique a montré le lien entre les feux de forêts et le climat en identifiant les paramètres climatiques suivants : maxima et minima de températures, précipitation, durée d'ensoleillement, événements de Foehn et humidité relative (mesurée à 7 heures, 13 heures et 19 heures).

De plus, les conditions climatiques ont également des impacts sur la végétation, l'évapotranspiration réelle, les conditions de la végétation au sol, etc.

Le déclenchement des feux de forêts peut être lié à des actions humaines (nombreuses causes) et naturelles (foudre), mais les causes humaines sont les plus communes et peuvent être intentionnelles ou non :

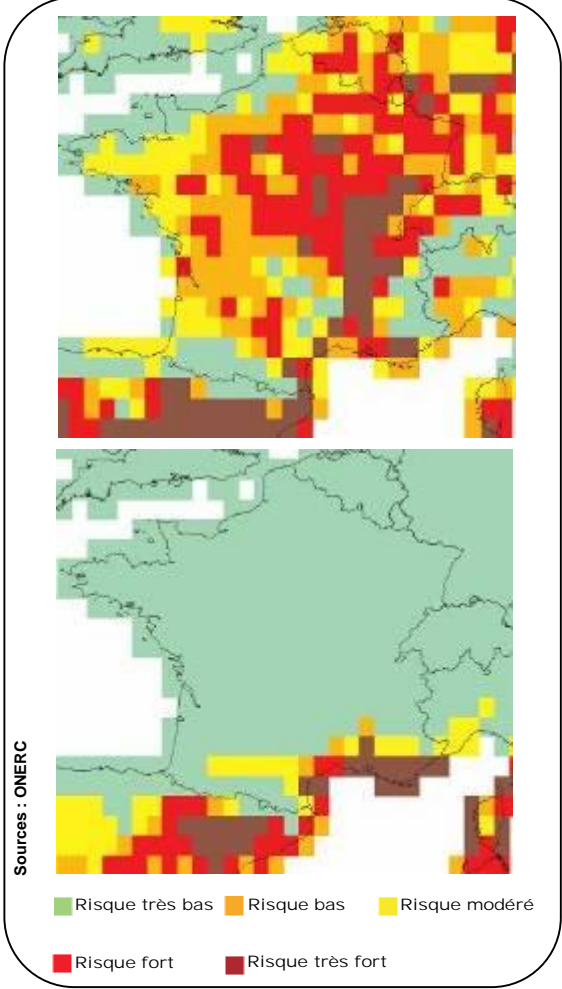
- ☞ Accidents liés aux infrastructures : installations électriques, chemins de fer, véhicules (camions et voitures) et stockage des déchets (officiel ou clandestin).
- ☞ Accident non intentionnels liés à des activités professionnelles : travaux forestiers, travaux agricoles comme l'écobuage et activités industrielles.
- ☞ Accident non intentionnels liés à des activités privées : travaux comme les feux de jardins, récréation comme les barbecues, feux d'artifices et disposition d'objets incandescents (surtout les mégots et les cendres de cigarettes).
- ☞ Actions intentionnelles : conflits liés à l'occupation des sols, intérêts liés à la chasse, à l'agriculture, pyromanie.



### Impacts observés du changement climatique sur les feux de forêts

Il n'y a pas d'évaluation scientifique de l'évolution des feux de forêts en lien avec le changement climatique. Cependant, pendant la canicule de 2003, de nombreux feux de forêts sont survenus dans des massifs montagneux qui ne sont habituellement pas affectés par ce genre d'événements (tel que le massif de la Chartreuse). Les deux cartes suivantes (cf. fig. 29) montrent l'indice de feux de forêts pour le même jour en 2003 et en 2004. La situation pendant la canicule est caractérisée par un danger feux de forêts généralisé. La région alpine est quasiment sans danger de feux pendant l'été « normal » de 2004 alors que c'est une zone de fort danger pendant l'été caniculaire de 2003.

Fig. 29 – Indice de risque feux de forêt - 13 août 2003 (haut) et 2003 (bas) – Calcul EC/JRC (Infocrest Action)



Des résultats d'une étude scientifique réalisée dans le canton du Tessin (Sud de la Suisse) montrent que les conditions de prédisposition au feu évoluent avec les conditions climatiques de sécheresse et que les variations annuelles de paramètres climatiques sont de peu d'utilité pour l'analyse des conditions de prédispositions aux feux de forêts. En effet, la prédisposition au feu peut varier de manière significative à une échelle de temps saisonnière, voir même mensuelle. Cependant, les valeurs interannuelles de conditions climatiques de sécheresse ont sûrement une influence sur les situations de danger feux de forêts.

### **Impacts potentiels du changement climatique sur les feux de forêts**

Il n'existe pour l'instant que des suppositions quant à la future évolution du danger feux de forêts dans un contexte de changement climatique. L'évolution du climat vers des conditions plus sèches en été peut potentiellement augmenter le danger de feux de forêts dans les massifs montagneux pendant la période estivale. Des situations de risques de feux de forêts très forts comme pendant la canicule de 2003 pourraient devenir plus communes d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Cependant, au vu de l'importance de la dimension humaine dans le déclenchement des feux de forêts, l'évolution future de ce risque est fortement liée aux comportements humains et à la réglementation vis-à-vis des feux de forêts (régulation des travaux agricoles et forestiers, interdiction des feux à buts récréatifs, etc.).



# Conclusions et contributions des autres partenaires français



# Conclusions

## Changements climatiques

- Les observations de température convergent vers une augmentation générale des températures dans l'arc alpin. L'amplitude de ce réchauffement varie en fonction des régions considérées. Dans les Alpes françaises, le réchauffement moyen a été de 0.9°C au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Les modélisations montrent que cette tendance de réchauffement devrait se poursuivre dans le futur. Les températures moyennes dans les Alpes pourraient augmenter au maximum de 3°C à 6°C d'ici à 2100.
- Les observations de précipitations ne montrent pas de tendances particulières dans les Alpes, quels que soient la saison et le seuil considéré. Les modèles climatiques ont des difficultés à représenter les régimes de précipitations en zone de montagne. Les tendances générales esquissées par les modèles proposent une augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été.

## Effets sur les milieux

- La durée et la hauteur du manteau neigeux ont toutes les deux diminué dans l'ensemble de l'arc alpin. Les modélisations d'évolution de la couverture neigeuse dans un contexte de réchauffement des températures de l'air montrent une diminution de la durée et de la hauteur du manteau neigeux tout au long du 21<sup>e</sup> siècle.
- La plupart des glaciers sont en phase de recul depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (milieu du 19<sup>e</sup> siècle). Cette phase de retrait d'origine naturelle s'est fortement accélérée avec l'augmentation des températures de l'air au

20<sup>e</sup> siècle. Certains glaciers alpins pourraient disparaître d'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

- Les observations montrent une dégradation du permafrost alpin et une augmentation de la vitesse de déformation des glaciers rocheux dans les Alpes. Cette dégradation semble être plus importante dans les topographies complexes, comme les sommets.
- Les observations montrent encore peu de tendances concernant l'hydrologie des rivières alpines (régime moyen, crues et étiages). Néanmoins, l'évolution des précipitations, du couvert neigeux et des glaciers devrait se refléter dans le régime des cours d'eau et induire une diminution de la ressource en eau sur le long terme après une augmentation temporaire durant la phase de fonte importante.
- Certaines espèces de plantes ont eu tendance à migrer en altitude, de même que les parasites et vecteurs de maladies ont migré vers des plus hautes latitudes. L'évolution de la végétation dans le futur par rapport aux conditions actuelles dépendra de la différence entre des effets « positifs » (moins de jours de gel, augmentation de la période végétative, etc.) et des effets « négatifs » (moins d'eau disponible, développement de nouvelles maladies, sécheresse, etc.).

## Impacts sur les aléas naturels

- Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues a seulement été détectée pour quelques régions alpines (comme le sud de l'Allemagne). Dans les Alpes françaises, des signes de changements ont été détectés mais une analyse approfondie est nécessaire.

Dans le futur, les pics de crues liées à la fonte du manteau neigeux devraient être moins intenses et survenir plus tôt dans l'année. Une augmentation des crues hivernales et des sécheresses estivales est probable. Une fonte accélérée des glaciers pourrait compenser, sur le court terme, le déficit estival des rivières alimentées par des glaciers.

- ☞ Au cours des dernières années, les zones de départ des laves torrentielles ont eu tendance à remonter en altitude dans certains massifs (comme au Ritigraben ou dans les Écrins). Une augmentation des volumes de matériaux mobilisables à proximité des glaciers et l'évolution des précipitations extrêmes pourrait induire localement une augmentation de la fréquence et de l'intensité des laves torrentielles.
- ☞ L'activité avalancheuse ne semble pas avoir évolué de manière significative en terme de fréquence et de saisonnalité. Les paramètres d'intensité et de localisation n'ont encore été que peu étudiés. Dans le futur, l'activité avalancheuse devrait être très liée à l'évolution du manteau neigeux. Une diminution de la fréquence des avalanches à basses et moyennes altitudes est probable, de même qu'une augmentation de la proportion d'avalanches de neige humide. Des situations d'avalanche généralisées (comme celle qui a frappé les Alpes en 1999) restent tout à fait probables dans un climat plus chaud.
- ☞ Une augmentation de la fréquence des chutes de rochers a été observée à haute altitude pendant l'été caniculaire de 2003. Avec une augmentation des températures et, par conséquent, une dégradation du permafrost, une augmentation de la

fréquence des chutes de rochers est à attendre pour les zones de haute altitude.

Par contre, la réduction du nombre de cycles gel/dégel à basses et moyennes altitudes pourrait induire une diminution des chutes de rochers dans ces zones. De plus, une augmentation des précipitations (notamment des précipitations intenses) pourrait induire une augmentation des mouvements de terrain, et plus particulièrement des glissements superficiels.

- ☞ Au vu de la complexité des phénomènes glaciaires et de leur relative rareté, il est difficile de dégager des tendances à partir des cas observés. Une diminution de la stabilité des glaciers suspendus et une augmentation de la taille et du nombre de lacs proglaciaires, respectivement à cause d'une augmentation de la température de la glace et d'un retrait des glaciers, devraient être les deux principales conséquences du réchauffement climatique sur les risques glaciaires.
- ☞ L'activité des tempêtes ne montre pas de tendance particulière en France au cours des 50 dernières années. L'évolution des tempêtes dans un contexte de réchauffement climatique est difficile à prévoir compte tenu des incertitudes actuelles concernant le réchauffement préférentiel de la haute ou de la basse atmosphère et des hautes ou basses latitudes et les conséquences d'une augmentation de la vapeur d'eau.
- ☞ Au cours de l'été 2003, de nombreux feux de forêts se sont déclenchés dans des massifs jusque là épargnés par ce type d'aléa. Une multiplication des sécheresses et des canicules pourrait augmenter le risque de feux de forêts dans des zones considérées jusqu'à maintenant comme peu dangereuses.



## Contributions des partenaires français au WP 6, WP 7 et WP 8

### Contribution du WP 6 : Évaluation, prévention et gestion d'impacts spécifiques du changement climatique sur la Nature

*Cette contribution a été rédigée par Pascal Allemand (LST Lyon), Didier Hantz (LGIT Grenoble), Pierre Potherat, Johann Kasperski et Jean-Paul Duranthon (CETE Lyon).*

Dans le contexte du changement climatique, l'observation de l'évolution du territoire, et en particulier le suivi de l'évolution des versants, est un élément important pour préparer les stratégies d'adaptation. Une comparaison de différentes méthodes permet de pointer celle qui sera la plus pertinente pour détecter des changements sur le territoire et d'étudier ensuite le lien entre ces changements et des variations du climat.

Le but du WP6 était de réaliser des comparaisons, des évaluations et des améliorations de la prévention des mouvements du sol en utilisant des techniques de surveillance et de gestion. Le but final est de proposer une stratégie de réponse commune contre les risques naturels. Ces objectifs étaient découpés en deux modules et différentes activités. Parmi celles-ci, il y avait la réalisation d'un état de l'art des méthodes de surveillance et une analyse comparative de nouvelles techniques de télédétection (scannage avec des lasers, méthodes basées sur les satellites, interférométrie radar, etc.) sur des sites d'études.

Les activités du CETE de Lyon et de l'UCBL étaient focalisées sur l'évaluation des potentiels et des limites des données optiques de télédétection pour dériver des cartes de déplacements de surface sur trois sites alpins actifs : Sedrun (Grisons, Suisse), Séchillienne (Isère, France) et les Gorges de l'Arly (Savoie, France). Les travaux portaient également sur l'estimation des complémentarités entre l'imagerie optique et les mesures géodésiques conventionnelles. Les données de télédétection utilisées provenaient soit d'images satellites-HD, soit de scanners terrestres Laser et LiDAR.

Contrairement aux techniques traditionnelles, les techniques de télédétection permettent l'évaluation de l'évolution globale de glissements de terrain et de falaises de grandes dimensions. Une évaluation de ces techniques a été réalisée sur les trois sites instables mentionnés précédemment. En utilisant les techniques d'imagerie optique pour étudier la cinématique de ces zones instables, il a été montré que (1) les scanners lasers terrestres permettent d'acquérir des données sur des zones réduites avec des taux de glissement très élevés qui sont souvent inaccessibles à des survol aériens (2) et que la corrélation d'images multi-temporelles est un moyen rapide de construire des cartes de déplacements de surface :

☞ La technique du scanner terrestre Laser appliquée à l'étude des glissements de terrain permet de réaliser des nuages de points irréguliers en 3D de parties du terrain sur des périodes de temps très courtes et avec un bon degré de précision (de quelques centimètres sur des objets éloignés de quelques centaines de mètres).

Ainsi, en scannant un glissement à différentes époques, il est possible de quantifier des changements de la topographie. Une des limites de cette technique et la difficulté de reconstruire une image d'ensemble à partir de zones réduites. Malgré cet obstacle, la résolution et la précision des données sont d'environ 2 centimètres pour des distances de scanner inférieures à 80 mètres. Une des manières les plus aisées d'utiliser ces données consiste à créer et comparer des profils multi-temporels dans les différents nuages de points ;

☞ La corrélation d'images est utilisée pour dériver des cartes de déplacements à partir d'images multi-temporelles acquises pour une même aire d'étude. Cette technique est basée sur une recherche automatique des structures identiques. Ensuite, le décalage entre les positions d'une même structure sur deux images peut être associé avec des surfaces de déplacements qui sont survenues entre les deux dates. Enfin, en corrélant des images de différentes époques, il est possible de proposer une vue synoptique des déplacements. Différentes images peuvent être utilisées :

1. Les photographies aériennes obtenues via l'Institut Géographique National (IGN) associées à des corrélations d'image sont très pertinentes pour une analyse scientifique. L'archivage des photos aériennes couvre une période de 50 ans avec fréquence de mise à jour tous les 5 ans. La résolution spatiale est au minimum de l'ordre d'un mètre. Le seuil de détection est aux alentours des 2 ou 3 pixels.

2. Des images satellitaires à haute résolution optique (IKONOS et QuickBird, avec résolution de l'image < 1 mètre), traitées au moyen de techniques de corrélation peuvent être utilisées à la fois pour un usage scientifique et un usage de gestionnaire du risque. Bien que la périodicité des mises à jour puisse être ajustée, le manque d'archives ne permet pas d'étudier des glissements lents (< 2 m/jour). Ce type d'image est réservé à l'analyse de mouvements rapides.
3. L'acquisition régulière d'images transversales sur site est un moyen rapide, efficace et bon marché pour suivre l'évolution d'un glissement.

Les limites de la correction optique sont surtout dues aux changements de végétation, aux changements de la longueur des ombres (à cause de prises de vue à des heures différentes, différents angles de prise de vue et autres différences radiométriques). Ces différents facteurs rendent difficile l'ajustement des différents jeux de photos ; ceci est d'autant plus vrai pour l'analyse de glissements de terrain.

Voici des résultats obtenus pour les sites d'étude du CETE et de l'UCBL :

- ✎ Le glissement de Sedrun (Suisse) a régulièrement ralenti depuis 2002, ce qui fait suite à une phase d'accélération avec une augmentation de la vitesse de 150 % entre 1990 et 2002. La description détaillée de la cinématique, combinée à de la géologie in situ permet de prédire l'évolution future de ce site.
- ✎ En ce qui concerne la zone frontale du glissement de Séchilienne (France), il a été montré que la zone se déplace horizontalement plus qu'elle ne s'affaisse verticalement : en utilisant une série de données scannées par laser, l'équipe scientifique a confirmé que les blocs structurels qui composent la zone basculent vers l'aval.
- ✎ Enfin, au site des Gorges de l'Arly (France), le tunnel des Cliets subit des relâchements de pression qui sont difficiles à retracer en utilisant des techniques basées sur des images.

En conclusion, ces méthodes basées sur l'analyse d'image s'avèrent être des outils performants pour suivre l'évolution des mouvements de certains versants. De plus, elles sont complémentaires des techniques traditionnellement utilisées.

Les activités du LGIT de Grenoble ont porté sur le suivi de l'évolution des versants à une échelle temporelle qui est celle des changements climatiques de la période post-glaciaire (environ 10 000 ans), et à l'échelle spatiale de massifs homogènes comme le Vercors (massif calcaire) ou les Écrins (massif cristallin).

Ce suivi a consisté dans un premier temps, à évaluer les fréquences d'éboulements rocheux dans différents massifs ou versants relativement homogènes. Cette évaluation s'est faite à partir d'inventaires historiques portant sur quelques décennies à quelques siècles. Ces inventaires permettent de connaître les fréquences associées à différents volumes d'éboulement (plus de 100 m<sup>3</sup>, 1 000 m<sup>3</sup>, 10 000 m<sup>3</sup>, etc...), dans une zone donnée (massif ou versant homogène). L'établissement d'une loi fréquence-volume permet, par extrapolation, d'estimer les fréquences des éboulements de très gros volumes, qui n'ont pas forcément eu lieu pendant la période historique couverte par l'inventaire.

Pour détecter l'influence des changements climatiques passés, il est nécessaire dans un second temps, de déterminer les fréquences associées aux différentes périodes climatiques qu'ont connues les Alpes depuis la déglaciation, il y a une dizaine de milliers d'années. Ces fréquences ne peuvent être déterminées que pour les éboulements dont les traces sont encore visibles aujourd'hui, c'est à dire pour ceux dont le volume est supérieur à 106 m<sup>3</sup>. Ces événements étant relativement rares, un inventaire doit être réalisé à l'échelle de l'arc alpin. C'est pourquoi une base de données alpine est en cours d'élaboration, dans laquelle doivent figurer au minimum la localisation, le volume et la date de chaque éboulement.

La détermination du volume d'un éboulement nécessite de connaître la surface initiale sur laquelle se sont déposés les matériaux éboulés. Pour cela, différentes méthodes de prospection géophysique ont été testées. D'après les premiers résultats obtenus (éboulement du Lauvitel), la prospection électrique semble la mieux adaptée.

Pour estimer la date, la méthode la plus utilisée jusqu'à présent consiste à dater des débris végétaux trouvés dans le dépôt de l'éboulement, ce qui n'est pas toujours possible. C'est pourquoi une autre méthode basée sur l'exposition des surfaces rocheuses au rayonnement cosmique est développée. Celle-ci permet d'estimer l'âge de l'éboulement du Lauvitel à environ 3 600 ans.

A l'heure actuelle, le nombre d'éboulements datés dans les Alpes est encore insuffisant pour évaluer l'influence des changements climatiques passés. Pour mieux connaître les probabilités d'occurrence des gros éboulements et évaluer l'influence du changement climatique actuel sur celles-ci, il est nécessaire de poursuivre l'étude des éboulements préhistoriques en développant la base de données alpine et les méthodes de datation.

## Contribution du WP 7 : Impacts du changement climatique sur le développement territorial et l'économie territoriale

*Cette contribution a été rédigée par Vincent Boudières et Émmanuelle Marcelpoil (Cemagref de Grenoble, Division DTM).*

### Le changement climatique : de la question de la menace à celle des capacités de réponse

Le changement climatique est aujourd'hui incontestable. Les derniers travaux du GIEC viennent d'affiner les fourchettes de hausses de températures. Les connaissances sont en revanche moins précises dans le domaine des impacts, notamment locaux. En effet, l'incertitude relative à l'intensité et à la direction des changements climatiques, déjà importante aux échelles globales, devient exponentielle quand il s'agit d'évaluer ces mêmes impacts à l'échelle locale. Cette dernière est pourtant celle de l'adaptation, en particulier pour les territoires touristiques de montagne.

L'effort de recherche doit donc se porter sur l'analyse de la réponse au changement climatique à l'échelle de l'action. La connaissance du risque « changement climatique » ne peut en effet se limiter à la caractérisation de l'aléa. Dans le contexte d'incertitude forte, une attention aigüe portée à l'aléa tend à repousser le débat sur la vulnérabilité. La formalisation de scénarii sur l'aléa entretient de fait une vision déterministe du changement climatique, à partir de laquelle il semble difficile d'envisager des réponses différenciées. Appréhendé comme une menace externe globale, le changement climatique est moins souvent abordé en termes de capacité d'adaptation locale. Aussi, l'enjeu est de pouvoir

répondre à la question suivante : quelle est la capacité d'adaptation des territoires face au changement climatique ? Pour cela, il faut identifier et analyser les pratiques et les stratégies déjà mises en œuvre dans le domaine de la diversification touristique mais également et surtout, la nature des freins à une telle adaptation.

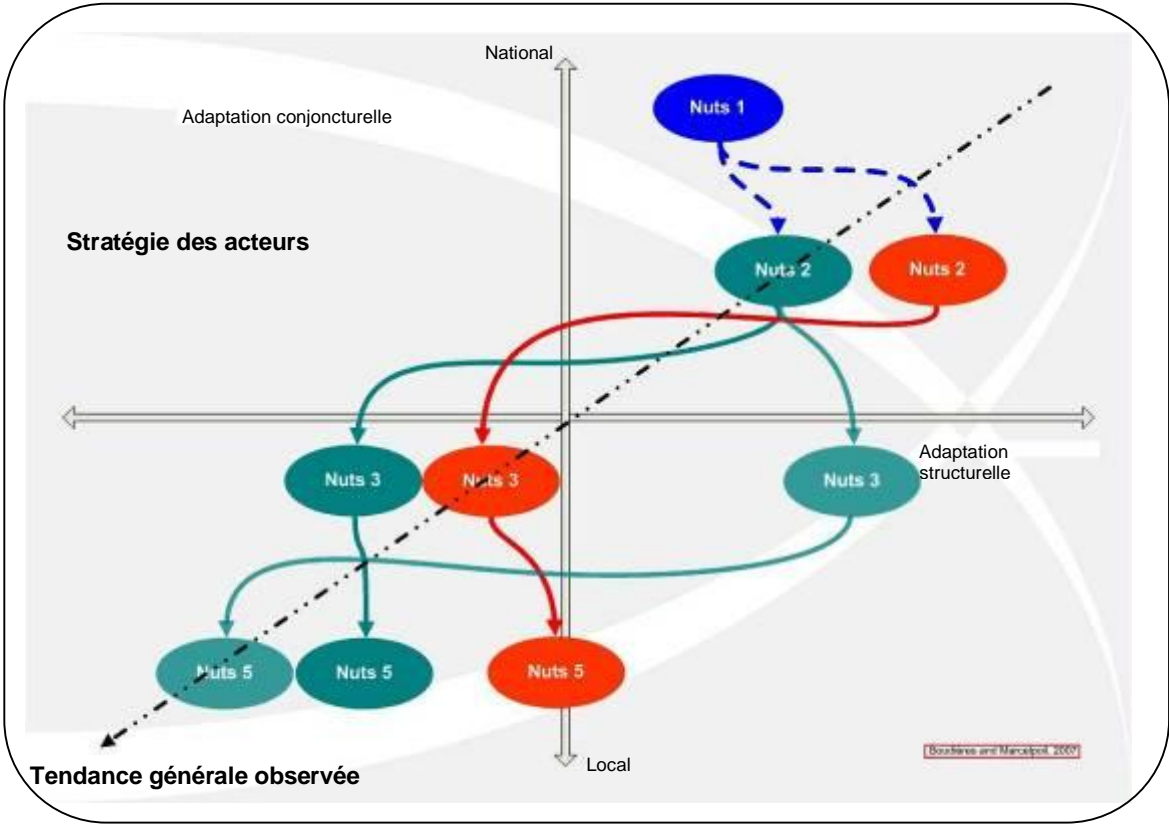
### Changement climatique et facteurs actifs de vulnérabilités

Dans un premier temps, la définition suivant du risque a été considérée :  $Risque = F(\text{aléa}, \text{vulnérabilité})$ , où F est une relation qui dépend du problème analysé. En ce sens, des réponses variées au changement climatique sont possibles, à la condition de s'intégrer dans une logique de vulnérabilité territoriale. Cette vulnérabilité, ou plus exactement les facteurs de vulnérabilité, renvoient aux acteurs, à leurs logiques. Elle met également en avant la cohérence ou non des actions et des mesures mises en place dans les stations de sports d'hiver. Ces dernières se révèlent des espaces pertinents, avec une réelle vulnérabilité, compte tenu de la forte densité de peuplement, des nombreux enjeux environnementaux, économiques et sociaux, ainsi que de la complexité de leurs modes de gestion. Les facteurs de la vulnérabilité sont divers. Ils concernent la nature même des modes de développement mais surtout renvoient aux modalités de gestion des stations touristiques. Le changement climatique est-il perçu et de quelle manière, en fonction des acteurs concernés ? Quel est l'accompagnement élaboré et mis en œuvre par les destinations touristiques ? Est-il en cohérence avec d'autres politiques conçues à des échelles d'intervention différentes ? Autant de questionnements qui mettent en avant les facteurs organisationnels et politiques dans la

lecture de la vulnérabilité des stations de sports d'hiver. Ces facteurs ont été cernés grâce à des analyses stratégiques comparées. Basée sur des études empiriques, l'analyse a concerné l'articulation entre les stratégies d'action des acteurs publics (Nuts 1, 2, 3 et 510) et celles des acteurs de l'économie touristique montagnarde (cf. fig. 30). L'analyse proposée souligne la force des enjeux pour les territoires touristiques de montagne français. Elle met également en exergue l'importance de leurs modes de gestion où l'entrecroisement des compétences et des stratégies ajoute à l'incertitude sur le changement climatique. Au-delà de la menace externe représentée par le changement climatique, le management territorial de demain ne pourra faire l'économie d'une réflexion relative aux conditions d'émergence de coordinations, de projets partagés et de stratégies collectives.

L'éparpillement, les divergences et l'entrecroisement des actions ne favorisent pas la construction d'une adaptation pertinente et durable. Or, pour contrecarrer les effets du changement climatique, la finalité est de s'intéresser aux facteurs actifs de vulnérabilité, structurels ou organisationnels. Il s'agit non pas d'imposer une vision uniforme du risque, mais bien de respecter les sensibilités territoriales et ainsi la manière dont chaque niveau développe sa propre formulation du problème. La recherche d'efficacité dans l'adaptation ne consiste pas à niveler les divergences, mais bien à construire dans la pluralité, des espaces de convergence, et ce afin de contribuer à la durabilité des destinations touristiques.

**Fig. 30 – Schéma de la stratégie des acteurs touristiques face aux changements climatiques**



<sup>10</sup> Nuts : Nomenclature d'Unités Territoriales Statistiques. Cette nomenclature européenne facilite les comparaisons entre pays, ou entre régions, d'un même ensemble. Pour la France, les correspondances sont les suivantes : Nuts 1 : Etat, Nuts 2 : Région, Nuts 3 : Département, Nuts 5 : Commune.

## Contribution du WP 8 : Réseaux de réponses flexibles – réflexion à propos d'une possible adaptation des structures administratives et politiques

*Cette contribution a été rédigée par Jean-Marc Vengeon (PGRN) et Sandrine Descotes-Genon (Région Rhône-Alpes).*

L'objectif du WP8 était de fournir aux décideurs et aux administrations de l'Espace alpin des recommandations pour la conception d'actions communes en vue de renforcer la gestion intégrée des risques naturels et de faire face aux impacts du changement climatique. En particulier, il s'agissait d'étudier l'intérêt et la faisabilité d'un réseau alpin institutionnel chargé de promouvoir et échanger plus rapidement les idées et les savoir-faire dans le domaine de la gestion intégrée des risques naturels et des stratégies d'adaptation au changement climatique. La Région Rhône-Alpes a participé activement aux différents travaux de ce groupe. En premier lieu, chaque système national ou régional de gestion des risques naturels a été décrit et documenté : acteurs institutionnels, règlements et procédures. Un outil spécifique d'archivage et de consultation de l'information a été créé pour permettre d'accéder efficacement à cette information : la base de donnée PLANALP-DB est accessible sur le site du projet [www.climchalp.org](http://www.climchalp.org). Une collection d'exemples particulièrement significatifs pour chaque Région ou Etat partenaire (« best practices ») a été constituée et ajoutée à la base de données. Dans un second temps, une enquête sur les points forts et les points faibles de la gestion actuelle des risques naturels a été réalisée auprès de gestionnaires des différentes régions. L'analyse de ces contributions a permis l'établissement d'un « état de l'art » de la gestion des risques naturels dans les Alpes et a permis de

formaliser les recommandations attendues. Enfin, un séminaire technique international sur les impacts du changement climatique sur les crues de rivières et les phénomènes torrentiels a été organisé en mai 2007 à Bolzano (Italie). En conclusion, l'adoption d'une stratégie commune d'adaptation aux impacts du changement climatique sur les risques naturels à l'échelle de l'Espace Alpin est fortement recommandée. Pour permettre aux territoires alpins de « se préparer à l'inattendu », il est recommandé d'accentuer localement la gestion intégrée des risques naturels tout en prenant en compte des scénarios d'impacts du changement climatique et de développer les échanges dans un cadre de coopération interrégionale. Les recommandations pour la gestion intégrée des risques naturels consistent à développer davantage les collaborations intersectorielles et à utiliser toutes les ressources des réseaux locaux d'acteurs, à généraliser l'utilisation des cartes d'aléas, à renforcer la conscience et la responsabilité individuelle face au risque, à renforcer les programmes de maintenance des ouvrages de protection existant, à développer des outils de gestion des événements extrêmes (tels que les systèmes d'alerte)...

Concernant la collaboration interrégionale, il est proposé d'établir un « Réseau de Réponse Flexible » regroupant les gestionnaires du territoire et des risques naturels à l'échelle des Alpes pour permettre l'échange permanent et fluide des informations sur les impacts du changement climatique et des expériences d'adaptation au sein de l'Espace Alpin. Une série d'actions concrètes telles que des formations communes, des séminaires techniques et le développement d'un outil commun d'accès à l'information sont proposés.

## Table des matières

LISTE DES SIGLES _____	5
INTRODUCTION _____	7
LE PROJET CLIMCHALP _____	9
LES ORGANISMES FRANÇAIS IMPLIQUÉS DANS LE WP5 DU PROJET CLIMCHALP _____	11
L'ONERC _____	11
LE PGRN _____	11
LA RÉGION RHONE-ALPES _____	11
TEMPÉRATURE _____	13
OBSERVATIONS DANS LES ALPES _____	13
MODÉLISATIONS DANS LES ALPES _____	14
OBSERVATIONS DANS LES ALPES FRANÇAISES _____	14
MODÉLISATIONS DANS LES ALPES FRANÇAISES _____	15
OBSERVATIONS DANS D'AUTRES PAYS ALPINS _____	17
<i>Alpes allemandes</i> _____	17
<i>Alpes italiennes</i> _____	17
<i>Alpes suisses</i> _____	17
MODÉLISATIONS DANS D'AUTRES PAYS ALPINS _____	18
<i>Alpes allemandes</i> _____	18
<i>Alpes suisses</i> _____	18
PRECIPITATION _____	21
OBSERVATIONS DANS LES ALPES _____	21
MODÉLISATIONS POUR LES ALPES _____	22
OBSERVATIONS DANS LES ALPES FRANÇAISES _____	24
MODÉLISATIONS POUR LES ALPES FRANÇAISES _____	25
OBSERVATIONS DANS D'AUTRES PAYS ALPINS _____	25
<i>Alpes allemandes</i> _____	25
<i>Alpes italiennes</i> _____	26
<i>Alpes suisses</i> _____	26
MODÉLISATIONS POUR LES AUTRES PAYS ALPINS _____	27
<i>Alpes allemandes</i> _____	27
<i>Alpes suisses</i> _____	27
GLACIERS ALPINS _____	29
OBSERVATIONS DANS LES ALPES _____	29
OBSERVATIONS DANS LES ALPES FRANÇAISES _____	31
MODÉLISATIONS POUR LE GLACIER DE SAINT SORLIN (FRANCE) _____	34
OBSERVATIONS DANS D'AUTRES PAYS ALPINS _____	35
<i>Alpes italiennes</i> _____	35
<i>Alpes suisses</i> _____	36
COUVERTURE NEIGEUSE _____	37
OBSERVATIONS DANS LES ALPES FRANÇAISES _____	37
MODÉLISATIONS DANS LES ALPES FRANÇAISES _____	38
OBSERVATIONS DANS D'AUTRES PAYS ALPINS _____	38
<i>Alpes allemandes</i> _____	38
<i>Alpes italiennes</i> _____	39
<i>Alpes suisses</i> _____	39
PERMAFROST ALPIN _____	40
OBSERVATIONS DANS LES ALPES _____	40
GACIER ROCHEUX DU LAURICHARD (FRANCE) _____	41
PERMAFROST ET GLACIERS ROCHEUX DANS LES ALPES SUISSES _____	42

VÉGÉTATION ALPINE _____	43
OBSERVATIONS DE LA VÉGÉTATION EN FRANCE ET DANS D'AUTRES PAYS ALPINS _____	43
PROJECTIONS SUR L'ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION EN FRANCE _____	44
CRUES – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	47
DEFINITION _____	47
DONNÉES CONCERNANT LES CRUES DANS LES ALPES _____	47
SENSIBILITÉ DES CRUES AUX PARAMÈTRES CLIMATIQUES _____	47
IMPACTS OBSERVÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CRUES _____	48
IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CRUES _____	49
LAVES TORRENTIELLES ET CRUES TORRENTIELLES – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	50
DEFINITION _____	50
DONNÉES CONCERNANT LES ALEAS TORRENTIELS DANS LES ALPES _____	50
SENSIBILITÉ DES LAVES TORRENTIELLES AUX PARAMÈTRES CLIMATIQUES _____	51
IMPACTS OBSERVÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES LAVES TORRENTIELLES _____	52
IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES LAVES TORRENTIELLES _____	53
AVALANCHES – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	55
DEFINITION _____	55
DONNÉES CONCERNANT LES AVALANCHES DANS LES ALPES _____	55
DONNÉES CONCERNANT LES AVALANCHES EN FRANCE _____	56
SENSIBILITÉ DES AVALANCHES AUX PARAMÈTRES CLIMATIQUES _____	57
IMPACTS OBSERVÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES AVALANCHES _____	58
IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES AVALANCHES _____	59
MOUVEMENTS DE TERRAIN – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	60
DEFINITION _____	60
DONNÉES CONCERNANT LES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LES ALPES _____	60
MOUVEMENT DE TERRAIN / GLISSEMENTS DE TERRAIN SUPERFICIELS – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES _____	61
<i>Définition</i> _____	61



<i>Sensibilité des mouvements superficiels aux paramètres climatiques</i> _____	61	DEFINITION _____	73
<i>Impacts observés du changement climatique sur les glissements superficiels</i> _____	62	DONNEES CONCERNANT LES TEMPETES _____	73
<i>Impacts potentiels du changement climatique sur les glissements superficiels</i> _____	63	SENSIBILITE DES TEMPETES AUX PARAMETRES CLIMATIQUES _____	73
MOUVEMENT DE TERRAIN / GLISSEMENTS DE TERRAIN PROFONDS – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE _____	63	IMPACTS OBSERVES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES TEMPETES _____	73
<i>Définition</i> _____	63	IMPACTS POTENTIELS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES TEMPETES _____	74
<i>Sensibilité des mouvements profonds aux paramètres climatiques</i> _____	63	FEUX DE FORETS – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	75
<i>Impacts observés du changement climatique sur les glissements profonds</i> _____	64	DEFINITION _____	75
<i>Impacts potentiels du changement climatique sur les glissements profonds</i> _____	64	DONNEES CONCERNANT LES FEUX DE FORETS _____	75
MOUVEMENT DE TERRAIN / CHUTES DE ROCHERS – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE _____	64	SENSIBILITE DES FEUX DE FORETS AUX PARAMETRES CLIMATIQUES _____	75
<i>Définition</i> _____	64	IMPACTS OBSERVES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FEUX DE FORETS _____	76
<i>Sensibilité des chutes de rochers aux paramètres climatiques</i> _____	64	IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FEUX DE FORETS _____	77
<i>Impacts observés du changement climatique sur les chutes de rochers</i> _____	66	CONCLUSIONS _____	79
<i>Impacts potentiels du changement climatique sur les chutes de rochers</i> _____	66	CHANGEMENTS CLIMATIQUES _____	79
RISQUES GLACIAIRES – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	67	EFFETS SUR LES MILIEUX _____	79
DEFINITION _____	67	IMPACTS SUR LES ALEAS NATURELS _____	79
DONNEES CONCERNANT LES RISQUES GLACIAIRES _____	67	CONTRIBUTIONS DES PARTENAIRES FRANÇAIS AU WP 6, WP 7 ET WP 8 _____	81
RISQUES GLACIAIRES / VIDANGE DE LAC GLACIAIRE – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE _____	68	CONTRIBUTION DU WP 6 : ÉVALUATION, PREVENTION ET GESTION D'IMPACTS SPECIFIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA NATURE _____	81
<i>Définition</i> _____	68	CONTRIBUTION DU WP 7 : IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE DEVELOPPEMENT TERRITORIAL ET L'ECONOMIE TERRITORIALE _____	85
<i>Sensibilité des lacs glaciaires aux paramètres climatiques</i> _____	68	<i>Le changement climatique : de la question de la menace à celle des capacités de réponse</i> _____	85
<i>Impacts observés du changement climatique sur les vidanges de lacs glaciaires</i> _____	69	<i>Changement climatique et facteurs actifs de vulnérabilités</i> _____	85
<i>Impacts potentiels du changement climatique sur les vidanges de lacs glaciaires</i> _____	69	CONTRIBUTION DU WP 8 : RESEAUX DE REPONSES FLEXIBLES – REFLEXION A PROPOS D'UNE POSSIBLE ADAPTATION DES STRUCTURES ADMINISTRATIVES ET POLITIQUES _____	87
RISQUES GLACIAIRES / POCHE D'EAU GLACIAIRES – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE _____	70	TABLE DES MATIERES _____	88
<i>Définition</i> _____	70	LISTE DES ILLUSTRATIONS _____	90
<i>Sensibilité des poches d'eau glaciaires aux paramètres climatiques</i> _____	70	REFERENCES UTILISEES POUR CHAQUE THEMATIQUE _____	91
<i>Impacts observés et potentiels du changement climatique sur les vidanges de poches d'eau glaciaires</i> _____	70	BIBLIOGRAPHIE _____	93
RISQUES GLACIAIRES / CHUTES DE SERACS – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE _____	71	TEMPETES – OBSERVATIONS ET PROJECTIONS DANS UN CONTEXTE DE VARIATIONS CLIMATIQUES _____	73
<i>Définition</i> _____	71		
<i>Sensibilité des chutes de séracs aux paramètres climatiques</i> _____	71		
<i>Impacts observés du changement climatique sur les chutes de séracs</i> _____	72		
<i>Impacts potentiels du changement climatique sur les chutes de séracs</i> _____	72		

# Liste des illustrations

## Illustrations

Page 29 : Glacier d'Argentières en 1896 (gauche) et en 2003 (droite)

Page 30 : Mer de Glace en 2003

Page 33 : Glacier de Saint Sorlin (gauche) et d'Argentières (droite)

Page 34 : Glacier du Pré de Bar en 1929 (gauche) et en 2007 (droite)

Page 35 : Le glacier du Grand Aletsch en 1856 (gauche) et 2001 (droite)

Page 36 : Site de mesure du Col de Porte (haut) et massif de Chartreuse (bas)

Page 40 : Le glacier rocheux du Laurichard (Hautes-Alpes)

Page 42 : Gentiane jaune

Page 42 : Raisin noir

Page 43 : Bouleau dans la massif des Écrins (Hautes-Alpes)

Page 43 : Chenille processionnaire du pin

Page 44 : Melèze

Page 46 : Crue du Rhône à Sablons (Isère)

Page 47 : Crue du Rhône à Chonas (Isère)

Page 50 : Crue torrentielle du Doménon à St Martin d'Uriage en 2005 (Isère)

Page 51 : Dépôt morainique dans le massif des Écrins (Hautes-Alpes)

Page 51 : Lave torrentielle à Claix (Isère)

Page 52 : Ruissellement chargé de débris (Isère)

Page 53 : Lave torrentielle à Claix (Isère)

Page 54 : Avalanche du plateau d'Assy (Savoie)

Page 55 : Aérosol de poudreuse au col du Lautaret (Hautes-Alpes)

Page 56 : Avalanche de neige lourde au col du Lautaret (Hautes-Alpes)

Page 57 : Avalanche de plaque

Page 58 : Départ en plaque dans le massif de Belledone (Isère)

Page 58 : Coulée avalancheuse dans le massif de Belledone (Isère)

Page 59 : Chute de rochers sur la RN 85 à Laffrey (Isère)

Page 60 : Glissement superficiel à Saint Geoires en Valdaine (Isère)

Page 61 : Glissement superficiel à Reyssabot (Isère)

Page 61 : Glissement superficiel à Voiron (Isère)

Page 62 : Coulée de boue à Merlas (Isère)

Page 63 : Glissement profond de Séchilienne

Page 64 : Chute de rochers à Laffrey (Isère)

Page 64 : Chute de rochers à (Isère)

Page 65 : Chute de rochers à Oris (Isère)

Page 66 : Chute de sérac au glacier du Trift (Suisse)

Page 67 : Lac glaciaire de Rochemelon (Savoie)

Page 68 : Lac glaciaire d'Arsine (Hautes-Alpes)

Page 68 : Lac glaciaire de Rochemelon (Savoie)

Page 69 : Cavité de glace effondrée après la rupture de la poche d'eau de Tête Rousse (Haute-Savoie)

Page 70 : Le glacier d'Allalin et le chantier de construction du barrage du Mattmark (Suisse) avant (gauche) et après la catastrophe (droite)

Page 71 : Chute de Séracs au glacier du Weissshorn (Suisse)

Page 72 : Dégâts d'une tempête à La Tronche en 2007 (Isère)

Page 72 : Noyers couchés par une tempête au hameau du Lignet en 2006 (Isère)

Page 74 : Feu à Pont-en-Royans (Isère) en 2003

Page 74 : Feu du Néron à Grenoble (Isère) en 2003

Page 75 : Feu du Néron à Grenoble (Isère) en 2003

Page 81 : Feu de forêt en Chartreuse (Isère)

## Crédits photographiques

© ONERC / G. Prudent-Richard (p. 2, 3, 11, 36, 43, 45, 51, 76)

© Université de Fribourg /S. Morard (p. 2)

© T. Deniset (p. 2)

© MEDD (p. 3)

© Photothèque IRMa / Sébastien Gominet (p. 3, 46, 51, 52, 53, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 72, 74 et 75)

© Cemagref (p. 3, 40, 55, 56, 67 et 68)

© ANENA (p. 3 et 57)

© NOAA (p. 3)

© LGGE / C. Vincent (p. 29 et 32)

© J-M Lasalsa (p. 32)

© Atheme (p. 30)

© Martin Gerbaux / CNRS (p. 33)

© IGC (p. 34)

© Martens (p. 35)

© Holzhauser (p. 35)

© Parc National des Écrins (p. 42)

© Jean-Claude Martin (p. 43)

© CREA (p.44)

© Olivier Ali (p. 45)

© Mairie de Chonas (p. 45)

© Yannick Guigual (p. 50)

© Université de Savoie (p. 54)

© LGIT (p. 63)

© VAW (p. 66, 70 et 71)

## Références utilisées pour chaque thématique

Ce rapport technique a été réalisé en grande partie à partir de la plate forme de connaissances décrite page 9. Dans un souci de facilité de lecture, les références scientifiques correspondant aux arguments et aux valeurs proposées dans le texte ne sont pas insérées dans le corps du texte.

Si le lecteur souhaite approfondir une thématique en particulier et retrouver les références associées avec une valeur ou un argumentaire, il peut se rendre sur la plate forme de connaissances ([www.risknat.org](http://www.risknat.org)) afin d'obtenir cette information détaillée.

### Température

Haerbeli & Beniston 1998, Heimman & Sept 2000, Beniston & Jungo 2002, Bardossy et al. 2003, Beniston et al. 2003b, Jomelli et al. 2004, Schär et al. 2004, Beniston 2005a, Beniston 2005b, Casty et al. 2005, Horton et al. 2005, ONERC 2005, ALP-IMP 2006, Hennegriff et al. 2006, Jomelli et al. 2006a, Jomelli et al. 2006b, Maquaire 2006, ONERC 2006, Bodin 2007, Cat-Berro & Mercalli 2007, Ciccarelli et al. 2007, IPCC 2007, OFEN 2007, ONERC 2007

### Précipitations

Lateltin et al. 1997, Frei et al. 1998, Noverraz et al. 1998, Fallot 2000, Frei & Schär 2001, Schmidli et al. 2001, Alpert et al. 2002, Anfossi et al. 2002, CUDAM 2002, Etchevers et al. 2002, Moisselin & Schneider 2002, Schmidli et al. 2002, Bardossy et al. 2003, Beniston 2003, Beniston et al. 2003b, Christensen & Christensen 2003, Berthelot 2004, Jomelli et al. 2004, Barnett et al. 2005, Beniston 2005a, Casty et al. 2005, TORAVAL 2005, Reinhard et al. 2005, Brunetti et al. 2006, Hennegriff et al. 2006, Jomelli et al. 2006a, Maquaire 2006, Norrant & Douguedroit 2006, Perret et al. 2006, Ciccarelli et al. 2007, Schmidli et al. 2007

### Glaciers

Haerberli & Alean 1985, Haerberli & Hoelze 1995, Haerberli et al. 1997, Haerberli & Beniston 1998, Haerberli et al. 2000, PNR 31, Maisch et al. 2000, Reynaud & Vincent 2002, Vincent 2002, Hoelze et al. 2003, Gerbaux 2005, Paul et al. 2005, Deline 2006, Paul 2006, Haerberli et al. 2007, OFEN 2007, GIEC 2007, Paul et al. 2007, UNEP 2007, Vincent et al. 2007a, Vincent et al. 2007b

### Couverture neigeuse

Schneebeli et al. 1997, Etchevers & Martin 2002, Beniston et al. 2003a, Beniston et al. 2003b, Beniston 2005, Valt et al. 2005, Hennegriff et al. 2006, Cat-Berro & Mercalli 2007

### Permafrost

Müller 1947, Zimmermann & Haerberli 1992, Haerberli et al. 1997, Haerberli & Beniston 1998, Vonder Mühl et al. 1998, Francou et al. 1999, NRP 31, Harris et al. 2001, Harris et al. 2003, Gruber et al. 2004a, Gruber et al. 2004b, Lambiel & Delaloye 2005, Roer et al. 2005, Bodin 2007, Delaloye et al. 2007, Gruber & Haerberli 2007, Noetzi et al. 2007

### Végétation

Keller, Kienast & Beniston 2000, Theurillat & Guisan 2001, Vennetier et al. 2005, Legay & Mortier 2006

### Cruets

PNR 31, Stoffel & Monbaron 2000, Milly et al. 2002, Paul 2002, Christensen & Christensen 2003, OcCC 2003, Mudelsee et al. 2003, Schirmeier 2003b, Demirdijan 2004, ONERC 2004, GICC Rhône 2005, Bravard 2006, Lins 2006, Renard 2006, Seiler 2006, Hubert 2007

### Aléas torrentiels

Haerberli & al. 1997, Lateltin et al. 1997, Rebetez & Lugon 1997, Zimmermann & al. 1997, Stoffel & Monbaron 2000, Moirat & Nedellec 2003, Demirdijan 2004, Kääh & al. 2005, Stoffel et al. 2005, Deline 2006, Fischer & al. 2006, Götz & Raetzo 2006, Jomelli & al. 2006a, Jomelli & al. 2006b, Maquaire & al. 2006, Rouiller 2006, Seiler 2006, Stoffel & Beniston 2006

## Avalanches

Schneebeli & al. 1997, PNR 31, Stoffel & Monbaron 2000, Martin & al. 2001, Paul 2002, Demirdijan 2004, Jomelli & Pech 2004, Ancy 2005, Beniston 2005, Jomelli et al. 2006c, Seiler 2006

## Mouvements de terrain

Haeberli et al. 1997, Lateltin & al. 1997, Haeberli & Beniston 1998, Noverraz et al. 1998, PNR 31, Stoffel & Monbaron 2000, GIEC 2001, CIPRA 2002, Dapples 2002, Moirat & Nedelec 2003, Noetzli et al ; 2003, OcCC 2003, Oswald 2003, Beniston & Stephenson 2004, Demirdijan 2004, Gruber et al. 2004, Kääb et al. 2005, OcCC 2005, Bravard 2006, Compagnon & Marie 2006, Fischer et al. 2006, Götz & Raetzo 2006, Maquaire et al. 2006, Perret et al. 2006, PLANAT 2007

## Aléas glaciaires

Haeberli & Beniston 1998, PNR 31, Stoffel & Monbaron 2000, Kääb et al. 2005, OcCC 2005, Fischer et al. 2006

## Tempêtes

André et al. 2000, GIEC 2001, Bessemoulin 2002, Paul 2002, Planton 2002, ONERC 2004, Seiler 2006, PLANAT 2007,

## Feux de forêts

Johnson 1992, PNR 31, GIEC 2001, Rheinard et al. 2005, Legay & Mortier 2006

## Bibliographie

Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A. et al. (2002), Paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, N° 11.

André, J-C., Cariolle, D., Megie, G. et al. (2000), Evénements extrêmes, changements climatiques et effet de serre. *Revue VO2*.

Anfossi, D., Cappa, C., Von Hardenberg, J. et al. (2002), Statistical analysis of three series of daily rainfall in north-western Italy. *Nuovo Cimento della Società Italiana di Fisica C, Geophysics and Space Physics*, Vol. 25, pp. 99 - 121.

Bárdossy, A., Anagnostopoulou, C., Cacciamani, C. et al. (2003), Trends in extreme daily precipitation and temperature across Europe in the 2nd half of the 20th century. Deliverable D9 of STARDEX project: STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions.

Barnett, T., Adam J. & D. Lettenmaier (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, Vol. 438, pp. 303 - 309.

Beniston, M. & P. Junco (2002), Shifts in the distributions of pressure, temperature and moisture and changes in the typical weather patterns in the alpine region in response to the behaviour of the North Atlantic Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 71, pp. 29 - 42.

Beniston, M., Keller, F., Koffi, B. et al. (2003a), Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 76, pp. 125 - 140.

Beniston, M., Keller, F. & S. Goyette (2003b), Snow pack in the Swiss Alps under changing climatic conditions: an empirical approach for climate impact studies. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 74, pp. 19 - 31.

Beniston, M. (2005a), Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 162, p. 1587–1606.

Beniston, M. (2005b), Warm winter spells in the Swiss Alps: Strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site. *Geophysical Research Letter*, Vol. 32, 5 p..

Berthelot, M., Genin, A., & D. Gourdon (2004), Variabilité interannuelle des précipitations dans les Alpes du Sud pour la période 1951-2000 : Analyse statistique des séries. Université de Tours, Météo France CDM Indre et Loire, TOURS, 15 p. *Article non per review*.

Bessemoulin, P. (2002), Les tempêtes en France. *Annales des Mines*, pp. 9 - 14.

Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T. et al. (2006), Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800–2003 period, *Journal of Geophysical Research*, p. 111.

Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J. et al. (2005), Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology*, 26 p.

Christensen, J. & O. Christensen (2003), Severe summertime flooding in Europe - Even as summers become drier, the incidence of severe precipitation could increase. *Nature*, vol. 421, pp. 805 - 806.

Ciccarelli, N., Von Hardenberg, J., Provenzale, A. et al. (2007), Climate Variability in North-Western Italy during the Second Half of the 20th Century, *MedCLIVAR Special Issue of Global and Planetary Change*, in press.

CUDAM (Centro Universitario per la Difesa idrogeologica dell'Ambiente Montano) (2002), Valutazione di possibili tendenze in alcune variabili ambientali rilevanti per la sicurezza e la protezione civile in Trentino ed elaborazione di proposte per il miglioramento delle risorse per il monitoraggio e il controllo ambientale, CUDAM Report.

Dapples F. (2002), Instabilités de terrain dans les Préalpes fribourgeoises au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène: influence des changements climatiques, des fluctuations de la végétation et de l'activité humaine. Thèse de doctorat : Département de géosciences, géologie et paléontologie, Université de Fribourg, 159 p.

Dauphiné, A. Risques et Catastrophes. Paris : Édition Armand Colin, 2001. 288 p. ISBN 2-200-25042-8.

Delaloye, R., Peruchoud, E., Avian, M. et al. (in press): Recent Interannual variations of rockglaciers creep in the European Alps. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska.

Deuxième Colloque International Eau & Environnement (2007), Hydrologie, variabilité et changements, Hubert, P., École Nationale Supérieure d'Hydraulique de Blida, 30-31 Janvier 2007, 5 p.

Fallot, J-M. (2000), Évolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20e siècle, *Publ. Ass. Int. Clim.*, Vol. 13, pp. 100 - 109.

Fifth Rosenberg International Forum Banff (2006), « Managing Upland watersheds in times of Global change » (2006, Alberta). Impact of climate change on the management of upland waters : the Rhône river case, J.-P. Bravard, Alberta, Canada, Sept. 2006, 41 p.

Fischer L. A. Kääh, C. Huggel, et al. (2006), Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face. *Natural Hazards and Earth System Science*, vol 6, pp. 761 - 772.

Frei C. & C. Schär. (2001), Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitations in the Alpine region. *Journal of Climate Research*, 2001, Vol. 14, pp. 1568 - 1584.

Gerbaux, M. *Reconstruction du bilan de masse des glaciers alpins et impacts d'un changement climatique*. Thèse de doctorat : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Université Joseph Fourier, 2005. 132 p.

Géologie et Risques Naturels : La gestion des risques au Pays du Mont Blanc (2006, Sallanches) : Réchauffement climatique actuel et dynamique des versants de haute montagne, P. Deline, actes du colloque du 18 nov. 2006 à Sallanches / éd. par F. Amelot, Centre de la Nature Montagnarde, Sallanches.

GICC RHÔNE (2005), Impacts des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin du Rhône (projet GICC-Rhône, rapport final révisé - version courte). Boone, A., Habots, F., Martin, E. et al. Météo France / Cemagref / Ecole des Mines de Paris / CETP.

Giuffrida, A. & M. Conte. (1989), Variations climatiques en Italie : tendances des températures et des précipitations. *Publ. Ass. Int. Climatologie*, Vol. 2, pp. 209 - 216.

GREG (Groupe de Recherche En Géomorphologie) Université De Fribourg / Université De Lausanne (2005). Le pergélisol dans la région Mont Gelé – Mont Fort : Rapport de recherche 2004-2005. Lambiel, C. & R. Delaloye. Lausanne : UNIL, 12 p.

Gruber, S., Hoelze, M. & W. Haeberli. (2004a), Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. *Geophysical Research Letters*, vol 31, 4 p.

Gruber, S., Hoelze, M. & W. Haeberli. (2004b), Rock wall temperatures in the Alps - modelling their topographic distribution and regional differences. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 15, pp. 299-307.

Gruber, S. & W. Haeberli. (2007), Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112.

Haeberli, W. & J. Alean. (1985), Temperature and accumulation of high altitude firn in the Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 6, pp.161-163.

Haeberli, W. & M. Hoelze. (1995), Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 21, pp. 206-212.

Haeberli W. Wegmann M. & D. Vonder Mühll. (1997), Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Ecologiae geol. Helv.*, 1997, Vol. 90, 7 p.

Haeberli, W. & M. Beniston. (1998), Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 1998, Vol. 27, pp. 258 - 265.

Haeberli, W., Barry, R. & J. Cihlar. (2000), Glacier monitoring within the Global Climate Observing System. 2000, *Annals of Glaciology*, Vol. 31, pp. 241 - 246.

Haeberli, W., Maisch, M. & F. Paul. (2002), Mountain glaciers in global climate-related observation networks. *WMO Bulletin*, 2002, 51/1, pp. 18 - 25.

Haeberli, W. & H. Holzhauser. (2003), Alpine glacier mass changes during the past two millennia. *Pages News*, 2003, 1/11, pp. 13 - 15.

Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, et al. (2007), Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*, Vol. 46, pp. 150-160.

Harris, C., Davies, M.C. & R. Etzelmüller. (2001), The Assessment of Potential Geotechnical Hazards Associated with Mountain Permafrost in a Warming Global Climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 12, pp. 145 - 156.

Harris, C. Vonder Mühll, D. Isaken, K. et al. (2003), Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change*, Vol. 39, pp. 215 - 225.

Hennegriff, W., Kolokotronis, V., Weber, H. et al. (2006), Climate Change and Floods – Findings and Adaptation Strategies for Flood Protection. *KA - Abwasser, Abfall*, 53, Nr. 8.

Hoelzle, M., Haeberli, W., Dischl, M. et al. (2003), Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes. *Global and Planetary Change*, Vol. 36, pp. 295 - 306.

Impact du réchauffement climatique [on-line]. France : Groupement TORAVAL [Réf. du 09/03/2007]. Disponible en ligne : < <http://www.toraval.fr/rechauffement.php> >

Impact du réchauffement climatique en France [on-line]. France : ONERC [Réf. du the 27/10/2007]. Disponible en ligne : < <http://www.onerc.gouv.fr> >

IPCC (International Panel for Climate Change) (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contribution of working group II to the IPCC third assessment. Genève, 2001.

IPCC 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Aveyrit, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.

Italian Glaciological Committee [on-line]. Italy: Italian Glaciological Committee [Ref of the 20/10/2007]. Available online:

<[www.isat.unimib.it/comiglacio/comitatoglaciologico.html](http://www.isat.unimib.it/comiglacio/comitatoglaciologico.html)>

Johnson EA (1992), Fire and vegetation dynamics: Studies from the North American boreal forest. Cambridge: Cambridge University Press, 143 p.

Jomelli V. & P. Pech. (2004), Effects of the little ice age on avalanche boulder tongues in the French Alps (Massif des Ecrins). *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 29. Referenced as Jomelli & al. 2004a.

Jomelli, V., Pech, P., Chochillon, C. et al. (2004b), Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the French Alps. *Climatic Change*, 2004, Vol. 64, pp. 77 - 102.

Jomelli V., Déqué M., Brunstein D. et al. (2006a), Occurrence des coulées de débris dans le massif des Ecrins (Alpes françaises) au XXIème siècle. Estimation à partir du modèle climatique ARPEGE.

Jomelli V., Brunstein D., Grancher D. et al. (2006b), Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, (submitted).

- Jomelli V., Delval C., Grancher D. et al. (2006c), Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, in press.
- Jones, RN. (2000), Managing uncertainty in climate change projections-issues for impact assessment. *Climatic Change*, Vol. 45, p. 403 - 419.
- Kääb, A., Reynolds, J. & W. Haeberli. (2005), Glacier and permafrost hazards in high mountains. In: Huber, U.M. Bugmann, H.K.M. Reasoner, M.A. (eds.), *Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview)*. Springer, Dordrecht p. 225 - 234.
- Keller, F., Kienast, F. & M. Beniston. (2000), Evidence of response of vegetation to climatic change on high elevation sites in the Swiss Alps. *Regional and Environmental Change*, 2000, pp. 70-77.
- Klimawandel im der Alpenraum Auswirkungen und Herausforderung (2006), Risques naturels, changement climatique et gestion des risques. Götz, A. & H. Raetzo. In: Deuxième manifestation thématique "Changement du climat dans l'espace alpin - Effets et défis" à l'occasion de la 31e réunion du Comité permanent à Galtür, Wien, p. 20 - 29.
- Klimawandel im der Alpenraum Auswirkungen und Herausforderung (2006), Les changements climatiques dans l'espace alpin : tendances, retombées et défis. Seiler, W. In: Deuxième manifestation thématique "Changement du climat dans l'espace alpin - Effets et défis" à l'occasion de la 31e réunion du Comité permanent à Galtür, Wien, p. 7 - 19.
- Lateltin, O., Beer, C., Raetzo, H. et al. (1997), Instabilités de pente en terrain de flysch et changements climatiques. Rapport final PNR 31, vdf – Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 168 p.
- L'eau en Montagne (2002, Megève) : Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. Etchevers, P. & E. Martin, Grenoble : Centre d'Etudes de la Neige, Météo France, 2002, 10 p.
- Lins, H. (2006), Comment on "IPCC WGII Fourth Assessment Report, Chapter 3: Freshwater Resources and their Management", 2006.
- Maisch, M., Wipf, A., Denzler, B. et al. (2000), Die Gletscher der Schweizer Alpen. Gletscherhochstand 1850, Aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien. vdf Hochschulverlag, Zurich.
- Maquaire, O., Malet, J-P., Sailhac, P. et al. (2006), Glissements alpins à contrôle hydrologique et changements climatiques Projet ACI-FNS GACH2C 2005-2007. Rapport intermédiaire.
- Martin, E., Giraud, G., Lejeune, et al. (2001), Impact of climate change on avalanche hazard. *Annals of Glaciology*, n°32, pp.163 - 167.
- Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K. et al. (2002), Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, Vol. 415, pp.514 - 517.
- Moisselin J-M. & M. Schneider. (2002), Homogénéisation des séries françaises de précipitations couvrant le 20<sup>e</sup> siècle. *La Houille Blanche*, N° 6/7, pp.126 - 130.
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G. et al. (2003), No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature*, Vol. 425, pp. 166 - 169.
- Müller, S.W. (1947), Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. JW Edwards; Ann.Arbor, Mich.
- Navarre, J-P. (2007), Climatologie des situations nivométéorologiques associées aux périodes avalancheuses importantes de ces 45 dernières années en Isère. Cemagref / Météo France, projet financé par le PGRN, 23 p.
- Noetzli, J., Gruber, S., Kohl, T. et al. (2007), Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112.
- Norrant, C. & A. Douguedroit. (2005), Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 83, 89 - 106.



Noverraz F., Bonnard C., Dupraz H. et al. (1998), Grands glissements de terrain et climat, VERSINCLIM – Comportement passé, présent et futur des grands versants instables subactifs en fonction de l'évolution climatique, et évolution en continu des mouvements en profondeur. Rapport final PNR 31, vdf – Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998, 314 p.

NRP 31 (National Research Program) (2000), Climate Risks - The Challenge for Alpine Region. Zürich : vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2000. 291 p. ISBN 3-7281-2709-4

OcCC (Organe Consultatif sur les Changements Climatiques) (2003), *Événements extrêmes et changements climatiques*. Bern : OcCC. 94 p.

OcCC (Organe Consultatif sur les Changements Climatiques) (2005), *Canicule de l'été 2003 : Rapport de synthèse*. Bern : OcCC. 28 p.

OFEV (Office Fédéral de l'Environnement) (2007), *Changements climatiques en Suisse. Indicateurs des causes, des effets et des mesures*. Ittingen : OFEV publication, 77 p.

ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) (2004), *Collectivités locales et changement climatique : Etes-vous prêts ? Un guide pour l'adaptation à l'attention des collectivités locales*. Paris : ONERC, 11 p.

ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) (2005), *Un climat à la dérive : comment s'adapter ? Rapport au Premier ministre et au Parlement*. Paris : La documentation Française, Juin 2005. 107 p.

ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) (2006), *Stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques*. Paris : ONERC, Novembre 2006. 56 p.

ONF-Service RTM Hautes-Alpes et Alpes Maritimes. (2006), *Instabilité gravitaire liée à la fonte du pergélisol dans les Alpes du sud : Cas du glacier rocheux du Bérard (Alpes de Haute - Provence)*. Compagnon F. & Marie R. Rapport non publié, 5 p.

Oswald, D. (2003), *Analyse de l'activité des glissements de terrain et relation avec les conditions climatiques : Exemple dans les PréAlpes Fribourgeoises* Thèse de doctorat : Département de géosciences, géologie et paléontologie Université de Fribourg. 132 p.

Paul P. (2002), *Reconstitution d'anomalies de paramètres climatiques et de fréquences de catastrophes naturelles (crues, sécheresses, tempêtes) au cours des 500 dernières années en Europe Centrale*. *La Houille Blanche*, N° 6/7, p. 111 - 114.

Paul, F. (2006), *The new Swiss Glacier Inventory 2000 – Application of Remote Sensing and GIS*. Schriftenreihe Physische Geographie – Glaziologie und Geomorphodynamik (University of Zurich), 52 p.

Paul, F., Kääb, A. & W. Haeberli. (2007), *Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies*. *Global and Planetary Change*, 56, p 111-122.

Perret, S. Stoffel, M. & H. Kienholz. (2006), *Spatial and temporal rock fall activity in a forest stand in the Swiss Prealps - A dendrogeomorphological case study*. *Geomorphology*, Vol. 74, p. 219 - 231.

PLANAT. (2007) : *Changement climatique et catastrophes naturelles en Suisse*. 4 p.

Planton, S. Déqué, M. Douville, H. et al. (2005), *Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique*, *Geoscience*, Vol. 337, p. 193 - 202.

PNR31 (Programme National de Recherche) (1997), *Instabilités de pente en terrain de flysch et changements climatiques*. Lateltin, O., Beer, C., Raetzo, H. et al. Rapport final PNR 31, vdf – Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 168 p.

PNR 31. (Programme National de Recherche) (1998), *Grands glissements de terrain et climat, VERSINCLIM – Comportement passé, présent et futur des grands versants instables subactifs en fonction de l'évolution climatique, et évolution en continu des mouvements en profondeur*. Noverraz, F., Bonnard, C., Dupraz, H. et al. Rapport final PNR 31, vdf – Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 314 p.

- PNR31 (Programme National de Recherche) (2000), Climate Risks - The Challenge for Alpine Region. Bader, S. & P. Kunz, Zürich : vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. 291 p. ISBN 3-7281-2709-4.
- PROCLIM. (1999), De pareils hivers à avalanches sont-ils encore normaux ? *Climate-Press* N°5 / avril 1999, 2 p.
- Rebetez, M., Lugon, R. & P. Baeriswyl. (1997), Climatic change and debris flows in high mountain regions : the case of study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps), *Climatic Change*, Vol. 36, p. 371 - 389.
- Reinhard, E., Rebetez, M. & M. Schaepfer. (2005), Recent climate change: Rethinking drought in the context of Forest Fire Research in Ticino, South of Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 9 p.
- Renard, B. (2006), Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de Doctorat, INPG, Cemagref, 364 p.
- Reynaud, L. & C. Vincent. (2002), Histoire des fluctuations des glaciers en remontant le Petit Age de Glace. *La Houille Blanche*, Vol. 8, 4 p.
- RISKYDROGEO (2006), Situation d'évacuation suite à la crue du torrent Durnand (juillet 2006) : La lave torrentielle du Durnand (25 juillet 2006) : une conséquence directe de la fonte du permafrost, Rouiller J.-D. Actes de la conférence finale internationale, p. 42 - 50.
- Risques Majeurs : Perception, Globalisation Et Management (2000) : Changements climatiques et risques naturels : un défi pour l'aménagement du territoire en zone alpine. Stoffel, M. & Monbaron, M. Actes du 5<sup>e</sup> Colloque transfrontalier CLUSE, Université de Genève, 21-22 septembre 2000, 6 p.
- Roer, I., Avian, M., Delaloye, R. et al. (2005), Rockglacier "speed-up" throughout European Alps – a climatic signal? Proceedings of the Second European Conference on Permafrost, Potsdam, Germany, June 2005: pp. 101-102.
- Schiermeier, Q. (2003), Alpine thaw breaks ice over permafrost's role. *Nature*, Vol. 424, p 712.
- Schiermeier, Q. (2003), Analysis poors cold water on flood theory. *Nature*, Vol. 425, p. 111.
- Schmidli, J., Scgmutz, C., Frei, C. et al. (2002), Mesoscale precipitation variability in the Alpine region during the 20th century. *International Journal of Climatology*, Vol. 22, p. 1049 - 1074.
- Schmidli, J., Goodess, C., Frei, C. et al. (2007), Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *J. Geophys. Res.*, Vol. 112.
- Schneebeli, M., Laternser, M. & W. Ammann. (1997), Destructive snow avalanches and climate change in the Swiss Alps. *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 90, p. 457 - 461.
- SHF (Société Hydrotechnique de France) (Grenoble, 1999), Le suivi du glacier rocheux de Laurichard (Hautes-Alpes) depuis 20 ans, par topographie des déplacements et sondages électriques. Francou, B. Fabre, D. Jomelli, V. et al. 3 p.
- SHF (Société Hydrotechnique de France) (St-Martin d'Hères, 2007), Le suivi du glacier rocheux de Laurichard (Parc National des Ecrins, Hautes-Alpes) : quelles réponses du pergélisol alpin face au réchauffement climatique ? Bodin, X., Thibert, E., Reynaud, L. et al. 1 p.
- SHF (Société Hydrotechnique de France) (St-Martin d'Hères, 2007), Recent climatic and glacial evolution in Western Italian Alps, and Ciardoney glacier mass balance (Gran Paradiso range). Cat - Berro, D. & L. Mercalli. 3 p.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D. et al. (2005), 400 Years of Debris-Flow Activity and Triggering Weather Conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland; *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 37, No. 3, 2005, p. 387 - 395.
- Stoffel, M. & M. Beniston. (2006), On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33.

Theurillat J-P. & A. Guisan (2001), Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic change*, Vol. 50, pp. 77-109.

UNEP 2007: Global outlook for ice and snow. United Nations Environment Programme, Nairobi (Kenya), Birkeland Trykkerri, Birkeland, Norway, 235 p.

Valt, M., Cagnati A., Crepaz A. et al. (2005), Recent trend of snow precipitation on Italian Alps. *AINEVA - Neve e Valanghe*, Vol. 56, p. 24 - 31.

Vennetier, M., Vila, B., Er-Yuan, L. et al. (2005), Impacts du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française. *Ingenierie*, N°44, p. 49-61.

Vincent, C. (2002), Influence of climate change over the 20th century on four French glacier mass balances. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107.

Vincent, C., Le Meur, E., Six, D. et al. (2007a), Very high-elevation Mont Blanc glaciated areas not affected by the 20th century climate change. *Journal of Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, 9 p.

Vincent, C., Le Meur, E., Six, D. et al. (2007b), Climate warming revealed at Col du Dôme (4250 m, Mont Blanc area). *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, 5 p.

Vonder Mühl, D., Stucki, Th. & W. Haeberli. (1998), Borehole temperatures in Alpine permafrost: a ten year series. In *Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost*, Lewkowitz AG, Allard M. (eds) Collection Nordicana 57, p. 1089 - 1095.

Zimmermann, M. & W. Haeberli. (1992), Climatic change and debris flows activity in high mountain areas: a case study in the Swiss Alps. *Catena Supplement*, Vol. 22, p. 59 - 72.

Zimmermann, M., Mani, P. & H. Romang. (1997), Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows. *Eclogae geol. Helv. Vol.*, 90, 415-420.

## Abstract

Mountain ranges are very sensitive to climatic variations. The impacts of climate change on these territories can be various, from the modification of the biodiversity to the permafrost melting and the evolution of natural hazards. The assessment of temperature rise and its impacts on mountains constitutes an important issue considering the strong uncertainties and the specific sensitivity linked to these areas. The territorial manager – policy makers and technicians – have to deal with this questioning for the implementation of short term actions as well as for strategic choices in terms of land planning and spatial development. This is why 22 public institutions from seven Alpine countries were involved in the European ClimChAlp project. The ONERC participated actively to this project in collaboration with the Rhône-Alpes Région and the Pôle Grenoblois Risques Naturels. This report is based on the synthesis realised by the French partners to propose a common base of knowledge about climate change and its impacts in the Alps.

## Résumé

Les milieux de montagne sont des espaces particulièrement sensibles à des variations climatiques. Modification de la biodiversité, dégel du permafrost, évolution des risques naturels sont autant d'impacts possibles du changement climatique. L'évaluation du réchauffement climatique et de ses impacts en zone de montagne constitue un enjeu autant par ses incertitudes que par la sensibilité caractéristique de ces milieux. Cette question s'impose donc aux gestionnaires - décideurs et techniciens - tant pour la conduite de leurs actions à court terme que dans le choix d'orientations stratégiques d'aménagement et de gestion des territoires. C'est pourquoi 22 institutions publiques de sept pays alpins se sont mobilisées pendant deux ans dans le cadre du projet européen ClimChAlp. L'ONERC a activement participé à ce projet aux côtés de la Région Rhône-Alpes et du Pôle Grenoblois Risques Naturels. Ce présent rapport expose la synthèse réalisée par les partenaires français pour proposer une base de connaissance commune sur les changements climatiques et leurs impacts dans les Alpes.

## ONERC PUBLICATIONS

*Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes.* Actes du colloque du 22 au 23 juin 2003, Onerc, Paris, 2003.

*Êtes-vous prêt ? Guide pour l'adaptation à l'attention des collectivités locales,* Onerc, Paris, 2004.

*Collectivités locales et changement climatique : quelles stratégies d'adaptation ?* Actes du colloque du 30 septembre 2004, Onerc, Paris, 2005.

*Un climat à la dérive : comment s'adapter ?* Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2005.

*Changement climatique : la nature menacée en France ? En savoir plus et agir.* Co-édition RAC-France, FNE, WWF, LPO, Greenpeace, Onerc, Paris, 2005.

*Réchauffement climatique : quelles conséquences pour la France ?* Onerc, Paris, 2006.

*« Littoral en danger », comment les régions maritimes d'Europe s'adapteront-elles au climat à venir ?* Actes du séminaire des 3 et 4 février 2006, Onerc/CRPM, Paris, 2006.

*Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique,* La Documentation française, Paris, 2007.

*Changement climatique : la Caraïbe en danger !* Actes du colloque des 11, 12 et 13 décembre 2006, sous presse.

*Changements climatiques et risques sanitaires en France.* Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2007.

## Technical Notes

*Recensement des études concernant les effets du climat et du changement climatique sur les espaces côtiers dans les DOM-TOM,* Onerc, Paris, mars 2005.

*Impacts du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral : scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100,* Conservatoire du littoral, Onerc, Paris, septembre 2005

*Impacts du changement climatique sur les activités vitivinicoles,* Onerc, Paris, janvier 2006.

*Recensement des études concernant les effets du climat et du changement climatique sur les espaces de montagne en France métropolitaine,* Onerc, Paris, mars 2008.

ONERC Web site: [www.onerc.gouv.fr](http://www.onerc.gouv.fr)

Région Rhône-Alpes Web site: <http://www.rhonealpes.fr>

PGRN Web site: <http://www.risknat.org>