

CIRCLE-2

Changement climatique et montagne:

**Impacts des changements
climatiques (facteurs naturels et
anthropogènes) et réponses
possibles dans les régions
montagneuses**

**Synthèse des projets de recherche de l'appel
CIRCLE-Montagne (2010-2013)**



Markus Leitner, Ingeborg Auer, Maurice Imbard, Marie Mojaïsky

MONTAGNES

Au cours des deux dernières décennies, la masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique a diminué, les glaciers de presque toutes les régions du globe ont continué à se réduire et l'étendue de la banquise arctique et celle du manteau neigeux de l'hémisphère Nord ont continué à diminuer au printemps (degré de confiance élevé) (GIEC/IPCC, AR5, WG1, Résumé à l'intention des décideurs).

Cette brochure a été éditée en anglais grâce au financement de l'ERA-Net CIRCLE-2, projet du 7ème programme cadre (PCRD) de la Commission Européenne. L'édition française, publiée par l'Association VERSeau Développement, a été financée par le Ministère de l'Ecologie (MEDDE). Les auteurs tiennent à remercier les chefs des projets ARNICA (Vincent Jomelli), CAMELEON (Nicolas Viovy), ChangingRISKS (Jean-Philippe Malet) et EURAS-CLIMPACT (Hermann Häusler) pour les textes de compte-rendu de leur recherche.

Nous remercions aussi les membres du Comité scientifique de CIRCLE Montagne sous la présidence du Dr. Ingeborg Auer (ZMG, Autriche), pour leurs conseils constants.

Photographies de couverture et page en face : Maurice Imbard (Massif du Mont Blanc et plateau du Vercors)

Contacts:

- **Markus Leitner**, Coordinateur CIRCLE-Montagne
Environment Agency Austria (EAA)
markus.leitner@umweltbundesamt.at
- **Maurice Imbard**, Chargé de mission changement climatique,
MEDDE/CGDD/DRI/SR
maurice.imbard@developpement-durable.gouv.fr



CIRCLE-2 Changement Climatique et Montagne:

Synthèse des projets de recherche de l'appel CIRCLE-Montagne (2010-2013)

Introduction	2
L'ERA-Net CIRCLE2	4
CIRCLE MONTAGNE.....	5
ARNICA	7
Changing Risks.....	13
CAMELEON	19
EURAS-CLIMPACT	24



Introduction

Les montagnes sont des régions terrestres importantes et particulières en ce qui concerne le climat. Celui-ci y varie avec l'altitude et diffère ainsi de celui des plaines adjacentes. La variation d'altitude engendre également une diversité de l'habitat et des espèces sur de petites distances spatiales.

Il est indéniable que les changements globaux (notamment le changement climatique) peuvent altérer la capacité des zones montagneuses à produire de la richesse, des biens et des moyens de subsistance pour les populations locales ainsi que pour d'autres plus éloignées mais néanmoins dépendantes.



Massif du Mont Blanc (photo Maurice Imbard)

Ainsi, les impacts augmenteront la pression environnementale sur les systèmes sociaux et naturels de ces régions, soulignant la nécessité urgente

de mettre en place de façon proactive des plans d'adaptation au changement climatique.

Compte tenu de la nature souvent frontalière et transnationale de ces régions, les réponses politiques au changement climatique en montagne doivent mettre l'accent sur les efforts de recherche multilatérale qui incluent les aspects biophysiques, sociaux, culturels et économiques. La recherche sur l'adaptation au changement climatique dans ces régions y compris dans ses aspects socio-économiques est ainsi d'une importance capitale pour plusieurs pays européens possédant d'importantes zones montagneuses.

Les montagnes couvrent 36% de la surface de l'Europe et abritent 17% de la population du continent. Les populations des zones montagneuses ainsi que celles beaucoup plus nombreuses vivant à leurs côtés doivent être prises en compte lorsqu'il s'agit de prévoir les conditions climatiques futures et d'évaluer les impacts et la vulnérabilité à ces changements. Les populations européennes dépendent fortement des ressources des montagnes, avec leurs fonctions essentielles de « château d'eau » et de services des écosystèmes, mais aussi pour leurs fonctions sociales comme le tourisme.

Selon le récent rapport spécial du GIEC/IPCC sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement (SREX 2102) « On estime avec un degré de confiance élevé que les modifications affectant les vagues de chaleur, la fonte des glaciers et/ou la dégradation du pergélisol auront des répercussions sur divers phénomènes des hautes montagnes, tels que l'instabilité des pentes, les mouvements de masse et les crues provoquées par la vidange soudaine de lacs glaciaires. De même, on estime avec un degré de confiance élevé que les changements attendus dans les fortes pluies auront un impact sur les glissements de terrain dans certaines

régions. ». « Il est plus difficile de déterminer où et quand dans le futur se produiront d'importantes avalanches de rochers, étant donné que celles-ci dépendent de conditions géologiques locales et d'autres facteurs non-climatiques. »

D'autre part « On estime avec un degré de confiance élevé qu'au cours de la dernière décennie, l'essentiel de la fonte des glaces a concerné les glaciers de l'Alaska, les régions arctiques du Canada, la périphérie de la couche de glace du Groenland, les Andes du sud et les montagnes d'Asie. Prises ensemble ces régions constituent plus de 80% de la perte de glace totale (GIEC/IPCC AR5, 2013) ».



Lans en Vercors (photo Maurice Imbard)

L'ERA-NET CIRCLE2

De 2004 à 2009 et de 2009 à 2014, les partenaires respectivement de CIRCLE (Climate Impact Research & Response Coordination for a Larger Europe) et de CIRCLE-2 ont coopéré pour financer la recherche, partager les connaissances sur les impacts du changement climatique, la vulnérabilité et l'adaptation et promouvoir de la coopération à long terme entre les programmes dédiés au changement climatique nationaux et régionaux en Europe. Les partenaires ont financé ou financent des projets ou des programmes de taille variée au niveau national (voir l'Infobase de CIRCLE-2 <http://www.circle-era.eu/np4/10>) et ont à travers des appels à projets compétitifs cofinancé nombre de projets transnationaux pour les régions nordiques, montagneuses ou méditerranéennes, cette dernière incluant des partenaires d'Afrique du Nord (voir http://www.circle-era.eu/np4/Joint_Initiatives).

Les objectifs de l'ERA-Net sont de développer et de renforcer la coordination des programmes de recherche nationaux et régionaux, et de contribuer à réduire les efforts fragmentés à travers l'Espace Européen de la Recherche (European Research Area - ERA). Dans le schéma ERA-Net, les « propriétaires » du programme (typiquement des ministères ou des autorités régionales) et les « gestionnaires » (typiquement des Agences ou Conseils pour la recherche) peuvent identifier les programmes de recherche qu'ils souhaitent coordonner ou bien initier et développer des activités communes, incluant l'appui à des appels à projets transnationaux. Au cours du temps la thématique principale de CIRCLE-2 a évolué des impacts à l'adaptation au climat.

CIRCLE-2 comprend 34 institutions venant de 23 pays (<http://www.circle-era.eu/np4/home.html>) qui travaillent ensemble pour :

- soutenir un agenda commun de recherche et des activités de programmation prospective communes aidant à structurer un langage et cadre partagé pour la recherche en appui aux politiques d'adaptation ;
- financer la recherche sur l'adaptation à travers des appels communs transnationaux et d'autres activités communes contribuant à une coopération durable entre les programmes de recherche sur le climat et leurs bailleurs de fonds ;
- rendre disponible la connaissance existante sur l'adaptation et favoriser la production de recherche selon les besoins identifiés pour contribuer au développement d'une base de connaissances européennes sur le changement climatique.

CIRCLE-MONTAGNE

Créé en 2002 par la Commission Européenne, le dispositif ERA-Net (European Research Area Network) a joué un rôle majeur pour mettre en rapport les centres de recherche européens : il permet aux organismes de financement de projets de recherche au niveau national de se coordonner sur le plan européen et d'élaborer des appels à projets communs. L'ERA-Net CIRCLE est un réseau européen destiné à coordonner la recherche sur l'adaptation au changement climatique (voir page précédente pour plus de détail). Il est organisé en sous-réseaux géographiques ou thématiques – région méditerranéenne, région nordique, et région montagneuse – pour lesquels la connaissance des différents impacts du changement climatique et les solutions d'adaptation possibles, exige une approche intégrée et commune.

Quatre appels à projet de recherche ont été lancés dans le cadre de CIRCLE correspondant aux trois groupes géo-thématiques:

- « *Gestion de l'eau en zones côtières Méditerranéenne* », 2007
- « *Conséquences du changement climatique pour le développement des politiques dans les pays du Nord* », 2007
- « *Adaptation en régions montagneuses* », 2009
- « *L'adaptation au changement climatique par une perspective des*

sciences naturelles et sociales: l'eau en zone côtière méditerranéenne », 2013

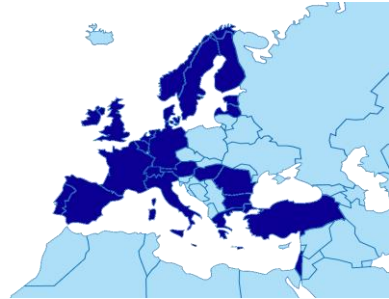


Fig. 1: Réseau CIRCLE-2 des 34 institutions partenaires venant de 23 pays différents

Les projets CIRCLE MONTAGNE

En 2009, les partenaires du groupe MONTAGNE de CIRCLE-2 ont lancé le troisième appel à projet commun de CIRCLE consacré aux « Impacts du changement climatique (facteurs naturels et anthropogènes) et réponses possibles dans les régions montagneuses ».

CIRCLE MONTAGNE s'est donné pour mission l'évaluation des besoins liés au changement climatique et les solutions d'adaptation dans des pays fortement liés aux systèmes montagneux, encourageant ainsi la coopération parmi les scientifiques et les décideurs à la fois en Europe et hors d'Europe. CIRCLE MONTAGNE a été financé par des fonds pour la recherche provenant

d'institutions en France, Autriche, Suède et Espagne.

La carte montre la localisation des projets et de leurs sites pilotes.

- Deux projets ont étudié les risques de glissement de terrain, à savoir ARNICA et ChangingRISKS

- Un projet est consacré aux écosystèmes montagneux, à savoir CAMELEON
- Un projet est consacré aux risques liés aux glaciers, à savoir EURAS-CLIMPACT

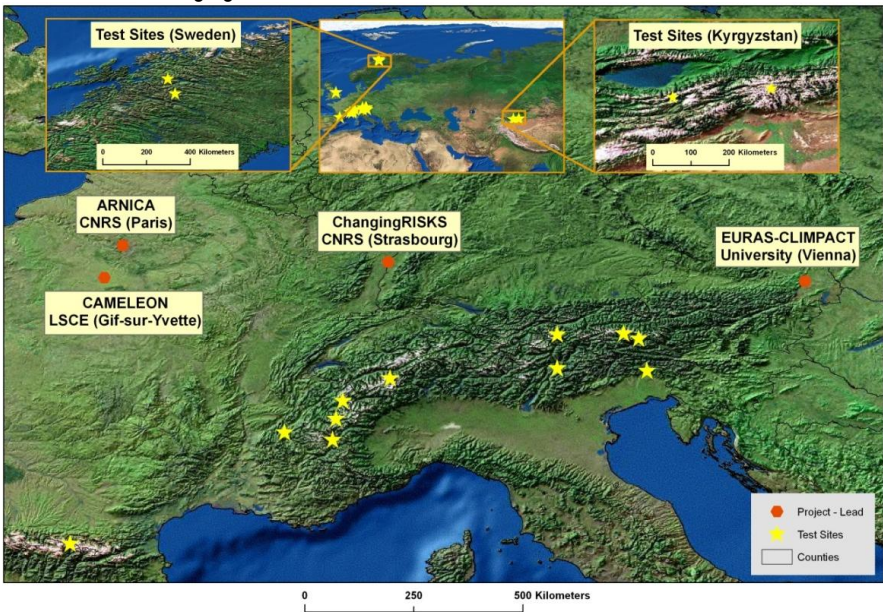


Fig. 2: Les projets CIRCLE MONATGNE et les sites pilotes (source : Markus Leitner, EAA)

Les financeurs sont :



ARNICA - Evaluation des risques liés aux laves torrentielles et glissements de terrain et leurs impacts sur les réseaux de transport dans un contexte de changement climatique dans les Alpes

Mot clefs: lave torrentielle, glissements de terrain superficiels, changement climatique, réseau de transport, Alpes

Partenariat: Coordinateur LGP CNRS (France) ; Wegener Center for Climate and Global Change, Université de Graz (Autriche); Université de Padoue (Italie); Dendrolab (Suisse)



Financement: 300.000 €

Financeurs: Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE, France) et Ministère Fédéral des Sciences et de la Recherche (BMWF, Autriche)

L'objectif général du projet était de déterminer les impacts potentiels du changement climatique futur sur l'activité des laves torrentielles / glissements de terrain (DF) dans les Alpes. Le réseau routier qui est une composante essentielle de l'activité économique de ces régions montagneuses en raison de son rôle dans les échanges transfrontaliers est particulièrement vulnérable à ce type de catastrophes naturelles. C'est pourquoi ARNICA a abordé la question de la vulnérabilité des réseaux dont le caractère est hautement stratégique.

L'Université de Graz (Autriche) s'est focalisée sur le développement de scénarios climatiques à haute résolution afin de proposer des données d'entrée aux analyses de risque réalisées par les autres partenaires. L'équipe s'est principalement concentrée sur les variables climatiques potentielles intervenant dans le déclenchement des processus.

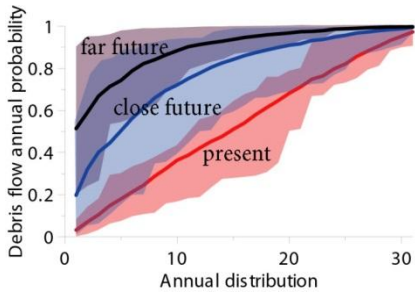


Fig. 3 Probabilité d'occurrence de laves torrentielles dans les Alpes françaises vers 2050 (close) et 2100 (far) d'après 24 simulations climatiques

L'analyse a porté sur les précipitations dans leur durée et leur intensité. Le rôle de la température a été également pris en compte afin de distinguer la nature des précipitations (pluie, neige). 24 simulations climatiques régionales (SCR) pour le 21^e siècle ont été analysées en se fondant sur le scénario d'émissions A1B (scénarios GIEC/IPCC de l'AR4). Une descente d'échelle par méthode statistique et une correction des erreurs (quantile/quantile) ont été systématiquement appliquées au pas de temps journalier afin d'améliorer les performances des SCR dans leur représentation du climat local. Ainsi il a pu être démontré que la méthode quantile-quantile améliore très nettement la qualité des simulations des précipitations extrêmes. Après correction d'erreurs, les 24 simulations ont été utilisées pour documenter la variabilité du climat futur. Les analyses ont été réalisées pour deux périodes distinctes : le futur proche autour de 2050 et le futur lointain vers 2100. **Les résultats montrent que les conditions climatiques favorables au déclenchement des processus considérés dans ARNICA devraient devenir plus fréquentes dans les Alpes pour la plupart des saisons, excepté en Juillet et Août. Toutefois, même en été, la fréquence des précipitations très intenses (plus de 30 mm/jour) augmenterait dans certaines régions.**

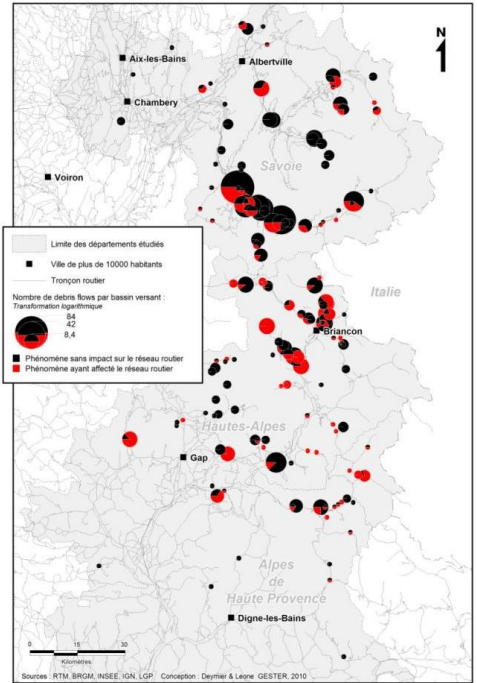


Figure 4: Tronçons de routes impactés par les laves dans les Alpes Françaises

L'équipe du LGP (Laboratoire de Géographie Physique, France) a porté son attention sur la caractérisation des impacts du changement climatique actuel et futur sur les DF dans les

Alpes françaises et leurs effets sur la vulnérabilité du réseau national. À cette fin les chercheurs ont utilisé une base de données RTM (Restauration des Terrains de Montagne) composée de 565 événements déclenchés depuis le printemps 1970, dans le nord et le sud des Alpes françaises. Les causes de la variabilité interannuelle de l'activité des laves torrentielles ont été explorées à une échelle régionale. Les résultats ont révélé des variables climatiques distinctes de part et d'autre des Alpes françaises. Un modèle hiérarchique bayésien a également été élaboré pour estimer la part respective des

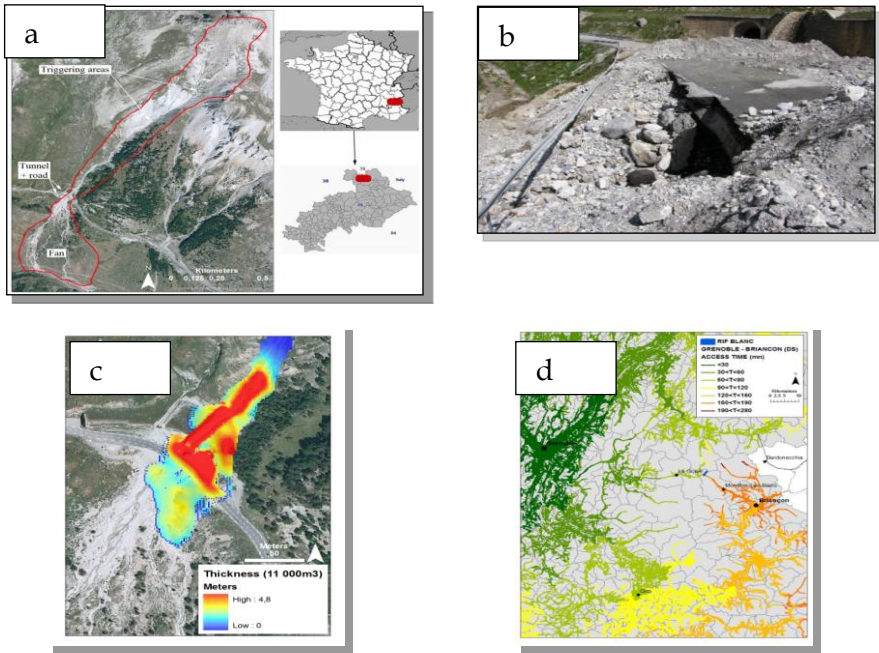


Figure 5 a b c d . Lave torrentielle du Rif Blanc le 11 juin 2012 impactant la route reliant Grenoble à Briançon. a) Bassin versant du Rif blanc, b) impacts causant la fermeture partielle de la route pendant plusieurs jours, c) volume estimé par modélisation MassMov 2D, d) Perte d'accessibilité induite par l'événement.

caractéristiques géomorphologiques et climatiques dans les activités des laves. **Ce modèle a souligné le rôle essentiel joué par le climat dans la probabilité d'occurrence des laves torrentielles par rapport à l'occupation du sol par exemple.** Par ailleurs, quel que

soit le modèle de climat utilisé, **une augmentation significative de la probabilité annuelle des laves est estimée au nord comme au sud des Alpes tant pour le futur proche que le futur lointain**

D'autres travaux ont porté cette fois sur la fréquence et la distance d'arrêt d'événements se produisant dans quelques bassins versants aux enjeux élevés en appliquant différents modèles dont celui mis au point par l'Université de Padoue, Italie. L'ensemble de ces résultats a été transféré aux décideurs à des fins opérationnelles. **Une carte des routes impactées par les laves et la perte associée de l'accessibilité aux territoires connexes pour différents scénarios de perturbation ont été réalisées pour l'ensemble des Alpes françaises** et remis aux acteurs locaux.

Un film consacré aux impacts des laves torrentielles sur le réseau routier a été élaboré pour le grand public. Une **analyse de la gestion de crise** basée sur un événement qui a touché la liaison *Grenoble à Briançon* a été menée en collaboration avec les partenaires locaux et a révélé une efficacité remarquable mais souligné une hétérogénéité dans la perception du risque. Une même analyse de perte d'accessibilité a été conduite dans la vallée de *Zermatt* en collaboration avec l'équipe Suisse.

La contribution de l'Université de Padoue dans le projet *ARNICA* a porté sur deux thèmes principaux :

- i) l'analyse des conditions de stabilité des versants soumis aux glissements superficiels selon les scénarios de précipitations portant sur la période actuelle et future,
- ii) l'intégration de l'évaluation de la réactivité des glissements de terrain dans l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux de transport en collaboration avec les partenaires locaux.

Ces analyses, basées sur un modèle hydrologique forcé à partir des scénarios climatiques proposés par l'équipe autrichienne, ont été réalisées sur un ensemble de bassins versants (2-10 km² de large) dans le sud du *Tyrol* (Alpes italiennes). **Les résultats montrent une augmentation progressive de la susceptibilité aux déclenchements de glissements de terrain superficiels en automne en raison de l'augmentation du pourcentage de précipitations liquides mais une diminution en été due à une diminution de l'humidité.** En conséquence, le fonctionnement de ce type de processus peut avoir un impact différencié selon les saisons sur la probabilité de défaillance du réseau de transport. Ainsi, en s'appuyant sur les scénarios climatiques futurs, la fiabilité du système est susceptible de diminuer en automne mais devrait au contraire augmenter en été. Ces résultats ont été discutés et analysés conjointement avec les représentants des collectivités locales, afin de mieux gérer les risques associés.

Le laboratoire de dendrogéomorphologie de Berne (Dendrolab, Suisse) a construit une base de données de laves torrentielles dans la vallée de *Zermatt* à partir d'une analyse des impacts laissés sur les arbres par le passage des coulées. Dans les zones périglaciaires de la région, ce processus est généralement déclenché par la liquéfaction du matériau non consolidé. Grâce à la liaison entre cette base événementielle et les relevés météorologiques remontant à 1864, 150 ans d'histoire de l'activité de ce processus ont été reconstruits. Les résultats montrent que la saison propice aux laves torrentielles sur ces sites de haute altitude est maintenant beaucoup plus longue (Mai à Octobre) qu'à la fin du 19^e siècle, limitée alors à Juin-Septembre. La recherche a également porté sur les impacts du changement climatique sur le fonctionnement de ce processus. Sur la base de la compréhension actuelle des laves et de leur réaction aux précipitations, on peut s'attendre à de **légers changements dans la fréquence globale des événements**. En revanche, **l'ampleur globale des flux matériaux pourrait, elle, augmenter en raison d'une plus grande disponibilité des sédiments**. À la fin du 21^e siècle, le nombre de jours avec des conditions favorables au déclenchement des laves sera probablement diminué, surtout en été. Ces résultats sur la fréquence et la magnitude des événements ont été utilisés par les intervenants et les décideurs à des fins opérationnelles. En particulier, et compte tenu de risques imminents de laves dans plusieurs des torrents de la vallée de *Zermatt*, Dendrolab a participé aux discussions avec les collectivités locales, les organismes de l'Etat et l'Office fédéral suisse de l'environnement pour effectuer des analyses coûts-avantages pour la protection des villages et du réseau de transport. **Les résultats d'ARNICA vont en effet avoir des conséquences sur les aménagements à venir du territoire et le fonctionnement ferroviaire et routier**. Ces résultats aideront à un meilleur équilibre entre la prévention et la réadaptation. Ainsi, les données d'ARNICA ont clairement permis de transmettre des connaissances importantes sur la façon dont les laves torrentielles se produisent dans la vallée de *Zermatt* et sur la façon de s'adapter et atténuer ces processus.

En résumé, la **perception du risque lié aux laves torrentielles** se distingue des autres risques naturels tels que les inondations. Excepté pour quelques sites régulièrement impactés par ce processus, cet aléa est **généralement perçu comme ayant des impacts mineurs**, sans doute en raison d'une étendue spatiale limitée. Pourtant chaque année de très nombreux tronçons sont impactés par les laves et notre étude démontre que **le réseau alpin est très vulnérable**. Dans les trois pays, des recherches ont été conduites avec les partenaires locaux pour réduire les risques liés à ces processus de versant. Cependant, à l'échelle locale il est **encore très difficile d'estimer une probabilité de déclenchement** en raison d'un manque d'observations météorologiques à une échelle de temps pertinente et d'un manque de données sur les volumes mobilisés pour déterminer avec précision une relation fréquence/ magnitude. Par ailleurs, les variables climatiques responsables du déclenchement de ce processus diffèrent selon les échelles spatiales et temporelles

considérées. A l'échelle journalière le déclenchement dépend principalement du délai entre le dernier événement et le précédent ainsi que les précipitations extrêmes dont le seuil d'intensité varie d'un endroit à un autre. A une échelle annuelle l'occurrence dépend aussi de la température. Cependant quel que soit le modèle climatique utilisé, une augmentation significative de l'occurrence ou de la magnitude des laves et glissements superficiels est estimé à la fois pour le futur proche et lointain pour les différentes régions.

Références :

- Pavlova, I., Jomelli, V., Grancher, D., Brunstein, D., Martin, E., Déqué, M., (2013). Debris Flow activity related to current climate conditions in the French Alps: a regional investigation based on Safran reanalyzed data;
- Jomelli, V., (2012). Alpine debris flows. *Science and Technology*, 4, 162-164.
- Stoffel, M., Mendlik, T., Schneuwly-Bollschweiler, M., Gobiet, A., **in press**. Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-013-0993-z.
- Borga, M., (2013). Forecasting, early warning and event management: non-structural protection measures for flash floods and debris flows. In: *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, 2013. Springer eds. ISBN: 978-94-007-4335-9, 47, 211-224.

ChangingRISKS - Modifications spatio-temporelles des risques de mouvement de terrain en montagne en réponse aux changements globaux

Mots-clés : précipitations, glissements de terrain, changement global, montagnes, gestion et analyse du risque, modélisation

Partenariat : CNRS - Institut de Physique du Globe de Strasbourg, France ; CNRS - Laboratoire Image, Ville, Environnement, Strasbourg, France ; Université de Vienne - Département de Géographie et d'Aménagement Régional, Vienne, Autriche ; CSIC - Station expérimentale d'Aula Dei, Saragosse, Espagne.



Financement: 295.010 €

Financeurs : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE, France) et Ministère de l'Économie et de la Compétitivité (MINECO, Espagne)

Les glissements de terrains dans les pays alpins sont identifiés par les autorités, les politiques et les scientifiques comme des menaces sérieuses à la fois socialement et économiquement ; ils représentent un risque important pour les populations et leurs biens. Malgré les nombreuses avancées scientifiques depuis près de 10 ans sur les mouvements de terrain, il n'existe pas de méthodologie pour gérer ces risques qui soit :

- adaptable dans de nombreux contextes climatiques et sociétaux,
- applicable à des scénarii qui intègrent les changements globaux (climatiques, occupation du sol),
- directement connectable aux demandes concrètes des gestionnaires.

Le projet **ChangingRISKS** a pour objectif d'améliorer les connaissances sur comment les changements globaux (climatiques et socio-économiques) modifieront la fréquence et l'intensité des aléas « mouvements de terrain » sur deux sites alpins, et comment ces changements peuvent être analysés, modélisés et communiqués (à travers des cartes) aux autorités. Le projet a été appliqué sur deux régions montagnardes : le bassin de *Barcelonnette* en France, et le bassin de *Waidhofen/Ybbs* en Autriche. D'un point de vue scientifique le projet avait comme objectif majeur de développer une méthodologie

opérationnelle et générique pour quantifier et gérer l'aléa et le risque « mouvement de terrain » qui tient compte de l'impact du changement global sur les facteurs de contrôle. D'un point de vue technique, le projet souhaitait développer une plateforme SIG (Système d'Information Géographique) d'expérimentation et de démonstration capable de cartographier de manière semi-automatique l'aléa, la vulnérabilité et le risque.

Le bassin de Barcelonnette (350 km²) est situé dans le sud-est de la France, dans le département des Alpes-de-Haute-Provence. Il est localisé dans un secteur montagnard (1100 à 3000 m d'altitude) qui associe une lithologie marneuse (les *Terres Noires*), des nappes de charriage (flysch) et de vastes dépôts morainiques. Le bassin est localisé dans la zone sèche intra-Alpine caractérisée par :

- un climat montagnard marqué par une grande variabilité interannuelle (735 ± 400 mm sur la période 1928-2010) et 130 jours de gel par an,
- un caractère continental avec des amplitudes thermiques journalières significatives (>20°),
- une influence méditerranéenne avec des épisodes orageux violents et intenses (50 mm./h).

L'occupation du sol actuelle est marquée par l'empreinte des nombreux processus de versant et torrentiels liés à la déforestation massive opérée jusqu'au 18^{ème} siècle. A partir de la moitié du 19^{ème} siècle, la reforestation et la correction torrentielle ont permis de juguler ces aléas (qui ont engendrés de nombreux dégâts sur les populations locales) mais ont modifié radicalement l'occupation du sol. Après la 2^{ème} Guerre Mondiale, l'urbanisation galopante et la déprise rurale progressive ont été les moteurs principaux des changements d'occupation du sol. Le développement récent de cette urbanisation et l'accroissement de l'activité touristique ont eu comme conséquence une pression foncière et urbaine accrue sur des terrains susceptibles de déclencher des mouvements de terrain.

L'aléa « mouvement de terrain » est ainsi très élevé dans ce secteur, les pentes étant frappées par de nombreux phénomènes : ravinement, glissements superficiels, laves torrentielles, glissements profonds.

La commune et le **district de Waidhofen/Ybbs** est situé dans le sud-ouest de l'Autriche. D'une superficie de 130 km², le site s'étend de 365 m à 1115 m d'altitude. 11 500 habitants peuplent la commune de *Waidhofen/Ybbs*. Les précipitations annuelles sont très variables, de 800 mm par an au nord du secteur à près de 2000 mm par an dans le sud. L'occupation du sol est principalement composée de surfaces forestières et agricoles. Dans la partie sud, la forêt prédomine alors que dans la partie nord ce sont les surfaces agricoles qui dominent le paysage. Waidhofen/Ybbs peut être considérée comme la capitale régionale

de ce secteur, elle est située au cœur du territoire où la rivière *Ybbs* forme sa plaine inondable; cette rivière est à l'origine de nombreuses crues depuis des siècles. La géologie est composée majoritairement de calcaires, de flysch et de dolomies. Les archives montrent que dès 1312, le secteur a été touché par d'importantes crues. Les premiers mouvements de terrain, dans ce cas présent des chutes de blocs, ont été enregistrés en 1589. Des laves torrentielles ont régulièrement détruit ou endommagé des infrastructures routières et ferroviaires, mais les archives ne sont complètes et exhaustives que depuis quelques décennies. A partir des années 1950, les archives rendent compte de tous les phénomènes géologiques qui ont frappé le territoire communal. Néanmoins, ces registres ne tiennent compte que des phénomènes qui ont engendré des dégâts.

L'influence des changements climatiques et d'occupation du sol sur l'activité des mouvements de terrain a été analysée à l'aide de différentes méthodes (statistique, empirique et modélisation à base physique) sur les deux sites d'étude : le bassin de *Barcelonnette* et la vallée de *Waidhofen/Ybbs*. L'analyse de susceptibilité menée sur *Waidhofen/Ybbs* montre clairement que les changements d'occupation du sol ont ainsi une influence certaine sur la susceptibilité des terrains (Fig. 6).

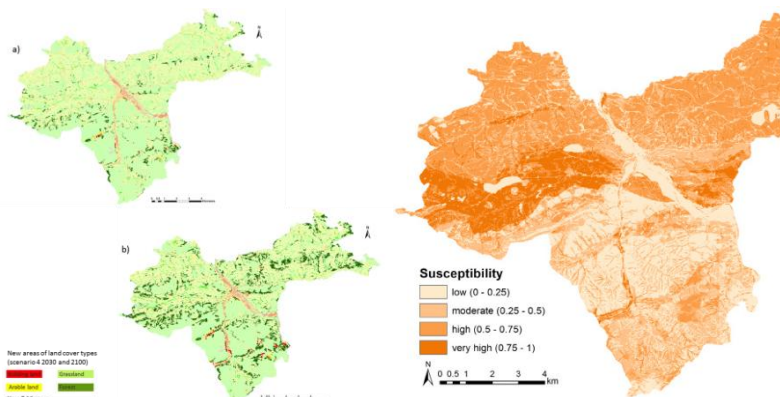


Figure 6: Occupation du sol et modélisation de la susceptibilité pour le secteur de Waidhofen/Ybbs

Concernant les changements induits par le climat, les analyses démontrent que les tendances de l'évolution de la susceptibilité liée au changement climatique sont similaires pour les deux sites, malgré leurs différences (climatiques, géomorphologiques). Les modèles, basés sur le scénario GIEC/IPCC A1B et adaptés à l'échelle locale, prédisent une augmentation probable de l'activité des mouvements de terrain. Cette augmentation se traduirait par une augmentation conjointe de la fréquence temporelle et de la surface des zones potentiellement instables. Cependant, les modèles nécessitent des données très

précises, ils doivent donc être systématiquement adaptés à l'échelle locale du site d'étude. Les différences entre les modèles globaux (à une large échelle spatiale) et les modèles adaptés à l'échelle locale s'expliquent par un processus plus rigoureux de la phase de calage et de validation. De plus, à une échelle locale, l'influence de la topographie sur le climat (pluies essentiellement) est beaucoup mieux prise en compte. En terme de prospective, pour améliorer ces analyses, ils seraient judicieux de :

- valider ces méthodes sur d'autres sites pour améliorer la robustesse des modèles ;
- intégrer les autres scénarios GIEC/IPCC pour mieux rendre compte de la variabilité climatique ;
- considérer l'évolution future de la géomorphologie (pentes et matériaux géologiques) provoquée par les mouvements de terrain et l'activité anthropique.

La comparaison en termes d'exposition aux risques « mouvements de terrain » sur les deux sites (situation actuelle et situation future) a été menée en bâtissant des cartes d'indices de dommages potentiels (PDI, Fig. 7) en fonction des scénarios climatiques envisagés. L'application et la validité de la méthode dépendent beaucoup de la disponibilité et la qualité des données. Les résultats montrent que si l'influence des changements climatiques et des changements d'occupation du sol est bien prise en compte par les modèles d'évolution, l'influence des changements démographiques et économiques est plus difficile à analyser à cette échelle.

Comme dans le cadre de l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa, les deux sites d'études montrent des résultats similaires pour l'étude des risques : dans les deux cas les risques vont augmenter, l'intensité de cette augmentation dépend essentiellement des paramètres pris en compte dans l'analyse. Considérant l'incertitude élevée quant aux données d'évolution de la population et du trafic routier, il est nécessaire de rester prudent sur l'interprétation des résultats. L'influence de l'hydrologie et de l'occupation du sol sur le facteur de sécurité a été analysée, cette méthodologie a été développée pour simplifier et accélérer l'estimation des zones susceptibles de déclencher un mouvement de terrain. Là encore les résultats sont prometteurs, mais doivent être améliorés en intégrant par exemple une plus large variété d'évolution de l'occupation du sol et/ou une analyse détaillée des changements de la végétation. Parallèlement, l'analyse de la vulnérabilité (physique et sociétale) des futures constructions a été menée. Pour l'intégrer à la gestion globale des futurs risques associés aux mouvements de terrain, il est nécessaire d'adapter cette méthode à toute la gamme des mouvements de terrain. Ainsi, l'évolution du risque serait une combinaison des changements de l'aléa (fréquence et intensité), de l'exposition et de la vulnérabilité.

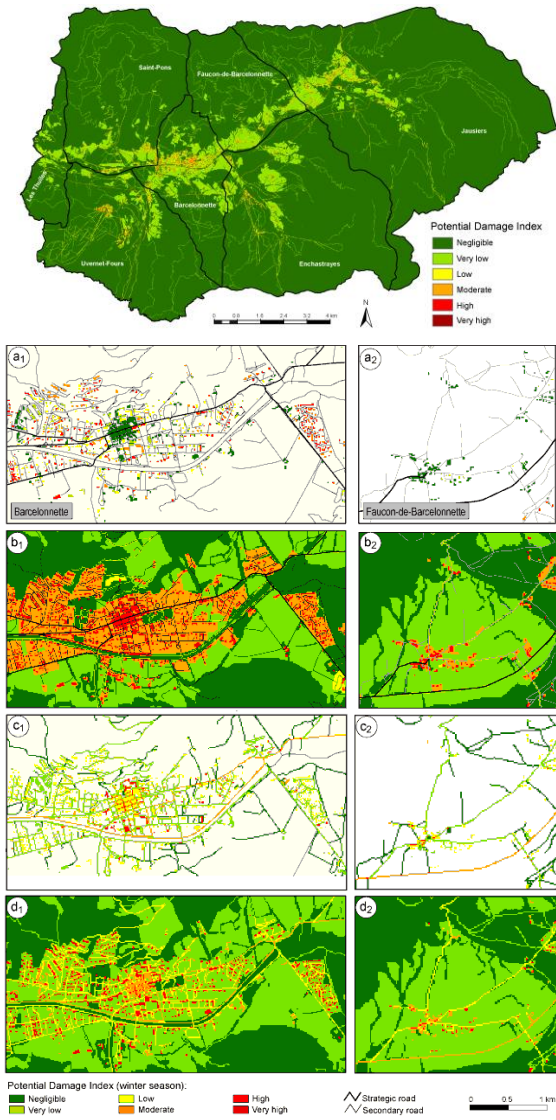


Fig. 7: Carte d'indice de dommages potentiels pour la saison estivale sur le site du bassin de Barcelonnette

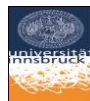
Références:

- Promper, C., Puissant, A., Malet, J.-P., Glade, T. Spatiotemporal development of the land cover as a basis for possible distribution of elements at risk - Case study Waidhofen/Ybbs (Austria). *Applied Geography* (submitted in September 2013).
- Puissant, A., Van Den Eeckhaut, M., Malet, J.-P., Hervas, J. Maquaire, O. Regional-scale semi-quantitative consequence analysis in the Barcelonnette Region, Southern France. *Landslides, Journal of the International Consortium on Landslides*, 15p. (submitted in January 2012).
- Remaître, A., Malet, J.-P. Rainfall patterns and climatic conditions associated to debris flows and mudslides at different time scales. A case study in the South French Alps. *Geomorphology*, 18p. (submitted in January 2013).
- Spickermann, A., Travelletti, J., Malet, J.-P., van Asch, Th.W.J. A dynamic model to quantify the development of slow-moving landslides in clayey soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14p. (submitted in October 2012).
- Stumpf, A., Lachiche, N., Malet, J.-P., Kerle, N., Puissant, A. 2013. Active learning in the spatial domain for landslide mapping with VHR optical images. *IEEE Transactions on Geosciences & Remote-Sensing*, 21p. (Accepted, in press).

CAMELEON - Dynamiques du Carbone dans les Ecosystèmes de Montagne: analyse des effets des changements anthropiques (climat et utilisation des terres) à l'échelle du paysage

Mots clés: changement climatique, changement d'utilisation des terres, cycle du carbone, écosystèmes alpins, élevage

Partenaires: Laboratoire de Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE – France), Zone Atelier Alpes (CNRS-France), NOVELTIS (France), Institut für Ökologie (Universität Innsbruck, Autriche) Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (Espagne)



Financement: 389.289 €

Financeurs: Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE, France), Ministère Fédéral des Sciences et de la Recherche (BMWF, Autriche) et Ministère de l'Economie et de la Compétitivité (MINECO, Espagne)

La combinaison du changement climatique et de l'utilisation des terres au cours des 50 dernières années a conduit à d'importantes modifications du couvert végétal et du fonctionnement des écosystèmes. Ces changements pourraient accélérer avec le changement climatique attendu pour le 21ème siècle. Les liens entre la dynamique de la végétation et de la productivité primaire des écosystèmes alpins et leur capacité à réduire les émissions de carbone sont encore mal compris.

L'objectif du projet **CAMELEON** est d'améliorer notre connaissance du cycle du carbone de ces écosystèmes alpins. Les principaux objectifs du projet sont ainsi:

- de comprendre comment les changements d'utilisation des terres se traduisent par des changements de la diversité fonctionnelle,
- de modéliser le cycle du carbone dans les écosystèmes alpins à l'échelle du paysage à l'aide d'un modèle de fonctionnement des écosystèmes,
- de prédire le potentiel des changements des stocks et flux de carbone et d'évaluer les possibilités d'adaptation des systèmes d'élevage.

Le projet *CAMELEON* cible trois sites expérimentaux de recherche à long terme situés dans les Pyrénées de l'Est (vallée *Alynia*, Espagne), les Alpes du Sud-Ouest (plateau du *Vercors*, France) et les Alpes de l'Est (vallée de *Stubai*, Autriche), représentant des contextes climatiques et historiques contrastés.

Le projet *CAMELEON* a, tout d'abord, mis en place une nouvelle base de données écologiques pour les trois régions d'intérêt. Un jeu de cartes d'évolution historique du couvert végétal à haute résolution depuis 1950 a été d'abord produit. Pour chaque site, plusieurs scénarios de changement d'utilisation des terres pour l'avenir proche (2030) sur la base de différentes hypothèses sur le changement climatique et le développement socio-économique de chaque région ont été construits en collaboration avec les différents acteurs locaux. La figure 8 montre ainsi une carte du changement du couvert forestier estimé pour le plateau du *Vercors* entre 1950 et aujourd'hui.

Un grand nombre de données ecophysiologiques a également été compilé comprenant des mesures de flux de CO₂, des mesures de traits fonctionnels et des relevés botaniques. Ces données ont permis de mieux comprendre la biodiversité des écosystèmes des montagnes sur les trois sites.

Une série de simulations utilisant le modèle d'écosystème terrestre ORCHIDEE a ensuite été réalisée :

- (1) Pour estimer l'évolution passée et future de la productivité des écosystèmes et le potentiel d'atténuation d'émission du carbone.
- (2) Pour comprendre quels étaient les principaux facteurs qui pilotent ces changements (par exemple, l'utilisation des terres, changement climatique ...)
- (3) Pour estimer les adaptations possibles des systèmes d'élevage.

Les trois sites présentent des réponses contrastées. Pour l'Autriche, on constate une augmentation relativement importante de la productivité à la fois pour la période historique et pour l'avenir. Cela induit une augmentation du stockage du carbone, même si l'augmentation de la productivité est en partie annulée par l'augmentation de la respiration des sols.

A l'opposé dans les Pyrénées, après une augmentation de la productivité au cours de la période historique, on constate une diminution progressive de celle-ci dans l'avenir en

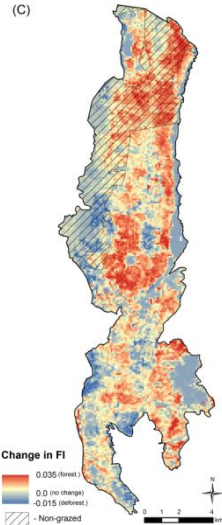


Figure 8 : Changement de la couverture de forêt dans le Vercors entre 1950 and 2010 (rouge=reforestation, bleu=déforestation)

raison de l'augmentation de la sécheresse estivale. Cela conduit à une perte de carbone après 2050. Les Alpes françaises montrent une réponse intermédiaire avec une augmentation de la productivité au cours de la période historique et une stabilisation après 2050. Le puits de carbone des sols diminue ensuite progressivement après 2050. À titre d'exemple, la figure 9 montre l'impact du changement climatique, du CO₂ et de l'utilisation des terres sur les tendances observées sur les différents flux dans le futur pour le cas de *Stubai* et du *Vercors*.

Pour la vallée de *Stubai*, le premier facteur qui conditionne l'augmentation de la productivité est la température, suivi de l'effet de la fertilisation du CO₂. Pour les Pyrénées, à l'inverse, le climat a un effet négatif principalement en raison de la diminution des précipitations. Cet effet négatif est partiellement compensé par l'effet positif du CO₂.

Comme pour les Pyrénées, *la Crau* devrait connaître une baisse de productivité. Cela devrait limiter les capacités d'augmentation possible de la production animale, même si la productivité des pâturages devrait augmenter dans les Alpes. Cependant, l'augmentation de la durée de la saison en altitude devrait permettre l'augmentation de la période d'estive. Cela permettrait le maintien de la production animale actuelle pour l'avenir.

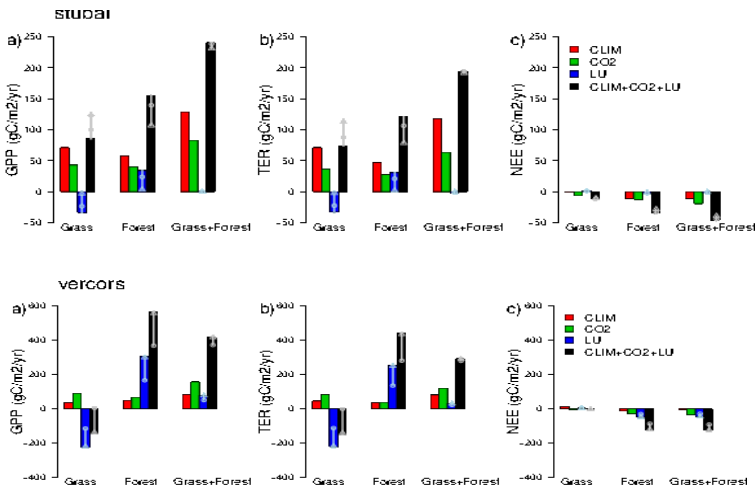


Figure 9: Attribution du rôle du climat, CO₂ et utilisation des terres sur le changement de futur des flux de carbone

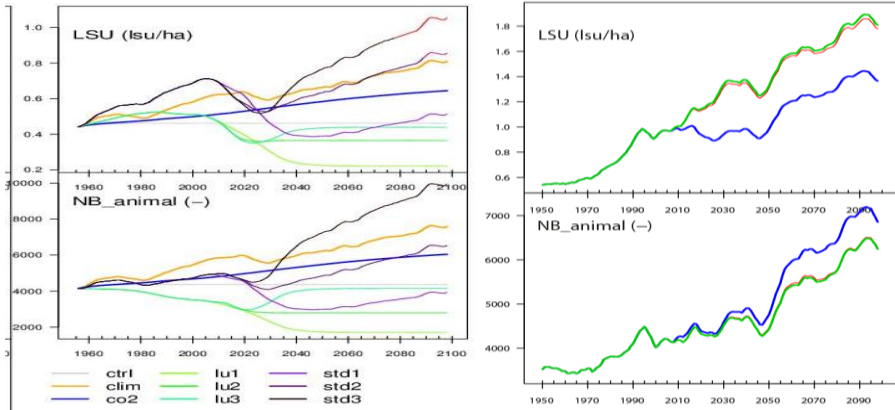


Figure 10: Evolution de la densité et du nombre total d'animaux pour (a) Stubai et (b) Vercors en considérant différentes combinaisons de facteurs et de scénarios d'utilisation des terres

Une deuxième série de simulations a été effectuée pour voir comment le système des prairies pourrait s'adapter à l'évolution prévue de la productivité, en particulier en termes de nombre d'animaux pouvant être produits pour chaque région. (Fig. 10)

Pour l'Autriche, l'augmentation de la productivité devrait permettre d'augmenter la production animale de plus de 30%. Cependant, cet effet climatique pourrait être contrebalancé par le changement projeté d'utilisation des terres qui se traduit par une diminution des prairies fauchées au profit des prairies pâturées. A l'inverse, pour la vallée d'Alpynia la sécheresse croissante à l'avenir pourrait diminuer le potentiel de la production animale. Enfin Pour le Vercors, le système est plus complexe car il s'agit d'un système transhumant où des animaux sont uniquement dans les montagnes pendant l'été, alors qu'ils sont en plaine de Crau pendant l'hiver.

Le projet CAMELEON est une première tentative de fournir des simulations fiables et comparables à l'échelle régionale de la dynamique du carbone dans les écosystèmes alpins européens qui intègrent notre connaissance écologique de ces points focaux de biodiversité. C'est aussi une première tentative d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur les systèmes d'élevage de ces régions. Il s'agit d'une étape importante vers une meilleure compréhension de l'impact du climat et du changement d'utilisation des terres sur la séquestration du carbone dans les montagnes européennes.

Références:

- Carlson, B. Z., C. Randin, I. Boulangeat, S. Lavergne, W. Thuiller, and P. Choler. *in press*. Working toward Integrated Models of Alpine Plant Distribution. *Alpine Botany*.
- Carlson, B. Z., J. Renaud, P.-E. Biron, and P. Choler. (*in press*) . Long-Term Modeling of the Forest-Grassland Ecotone in the French Alps: Implications for Pasture Management and Conservation. *Ecological Application*.
<http://dx.doi.org/10.1890/13-0910.1>
- Vicca S., Bahn M., Estiarte M., Alberti G., Ambus P.; Arain M.A.; Beier C., Bentley L., Borken W., Buchmann N., Collins S.; de Dato G., Dukes J. et al. (submitted) Can current moisture responses of soil respiration be extrapolated into a future with altered precipitation regimes? A synthesis of precipitation manipulation experiments. Submitted to *Global Change Biology*

EURAS-CLIMPACKT - Impacts du changement climatique, risques liés aux glaciers et stratégies d'atténuation dans les Alpes européennes, le Lapland suédois et le Tien Shan d'Asie Centrale

Mots clés: Changement Climatique, Impact des risques des glaciers, stratégies d'atténuation, Alpes autrichiennes, Glacier *Goldberg*, *Tien Shan* (Asie Centrale), Glacier *Inylchek*

Partenaires: Université de Vienne (Autriche), Institut central de Météorologie et Géodynamique (Autriche), Institut de Technologie Blekinge (Suède), Centre allemand des Géosciences (Allemagne)

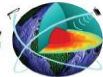


universität
wien



BM.W.L.F.^a
ZAMG

German Applied Geology
Remote Sensing
GIS



Financement: 243.000 €

Financeurs : Ministère Fédéral des Sciences et de la Recherche (BMWF, Autriche) et Conseil pour la recherche sur l'environnement, les sciences agricoles et l'aménagement du territoire suédois (FORMAS, Suède)

Les objectifs du projet étaient :

- d'établir une méthode empirique de régionalisation des données de réanalyses¹ NCEP (National Centers for Environmental Prediction) et des modèles de circulation Générale de l'atmosphère (GCM) en Europe,
- de simuler la fluctuation des glaciers pour la période 1948-2010 pour quantifier les variations de glaciers en Asie Centrale,
- de calculer les changements de la fonte future des glaciers et des débits de fonte au 21^{ème} siècle,
- d'évaluer les risques géologiques et proposition de stratégie d'atténuation des risques géologiques induits par le climat,
- de s'appuyer sur une coopération étroite avec les parties prenantes.

¹ Une réanalyse est une méthode consistant à combiner un modèle et des observations pour produire la meilleure carte météorologique du temps passé à un moment donné.

A la suite d'une phase test de modélisation du climat basé sur des données de réanalyses et une régionalisation statistique dans les Alpes autrichiennes, ce modèle a été transféré à des stations de haute montagne en Asie Centrale, pour la plupart desquelles seules des séries de données limitées de précipitations et de températures de l'air étaient disponibles. Des données locales du climat ont été calculées à l'aide de données globales de réanalyses NCEP (1948-2012) et le modèle global GCM ECHAM5 (2001-2050). Ces données calculées à l'échelle locale ont été utilisées pour le modèle glacio-hydrologique de l'évolution du débit de la fonte des glaciers (GERM). GERM a été calibré avec des données connues de bilan de masse, et validées avec des données de débit locales. Le développement futur des glaciers a été simulé pour les scénarios du GIEC/IPCC A1B, A2 et B1 jusqu'en 2050.

En conséquence depuis la fin des années 80 les glaciers de toutes les zones étudiées dans les Alpes européennes et en Asie centrale montrent un retrait rapide, un processus qui s'est accéléré depuis la petite période glaciaire durant les 150 dernières années.

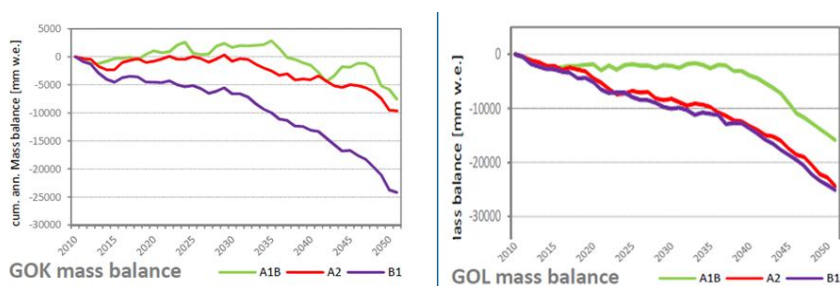


Fig. 11: l'augmentation calculée de la T° de l'air va causer des bilans de masse cumulée négatifs pour les glaciers des Alpes (GOK = Goldberg Glacier) et d'Asie centrale (GOL = Golubina Glacier) pour les scénarios A1B, A2 et B1 jusqu'à 2050.

Le réchauffement climatique amplifie la fonte des glaciers et réduit les surfaces de pergélisol, provoquant des changements dans l'environnement tels que des pentes instables ou la formation de lacs glaciaires, qui peuvent provoquer des crues brutales (glacier lake outburst floods ou GLOF), et augmentant ainsi les risques potentiels dans un futur proche. En 1996 le glacier Nord *Inylchek* en Kirghizie orientale s'est avancé rapidement de trois kilomètres en seulement deux mois, en initiant un deuxième GLOF cette année là. L'analyse de séries temporelles de données de télédétection des glaciers du Tien Shan central révèle que non seulement les glaciers se retirent, mais aussi de

soudaines avancées de glaciers ont lieu (“surge” en anglais) dont on comprend mal les causes et qui provoquent des risques sous-estimés.

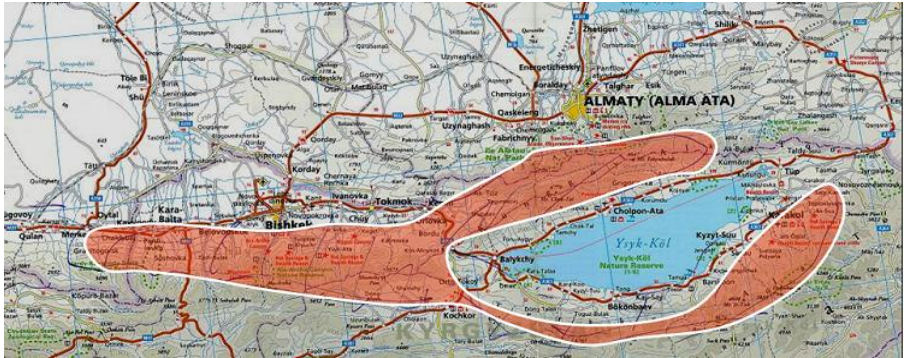


Figure 12: Carte des régions prioritaires de l'étude des GLOF en Kirghizie

Il est bien connu que l'Asie Centrale est fortement influencée par les tremblements de terre et beaucoup de structures de pentes du Tien Shan oriental central sont décrites comme d'origine néotectonique. Cependant les études de structure géologique et géomorphologique aux alentours de l'Observatoire du Changement Global “Gottfried Merzbacher” ont conclu que les terrasses multiples des pentes le long de la vallée *Inylchek* étaient d'origine sédimentaire, et non créés par des tremblements de terre, et que donc ce risque était de beaucoup surévalué dans la région.

Avant, pendant et après EURAS-CLIMPACT, le contact avec les parties prenantes Kirghizes telles que le Ministère des situations d'urgence, a surtout porté sur l'échange d'information sur la retraite des glaciers, l'augmentation possible des risques dus ou non au climat, la mise en place de système d'alerte rapide sur la base des données, les études de suivi pour la planification concrète de mesures d'atténuation et leurs implications socio-économiques.

L'excursion en hélicoptère et le travail de terrain lors d'une conférence à *Bishkek* en 2012 a été l'occasion de nombreuses discussions entre l'équipe autrichienne et les ministères Kirghizes, l'Académie Nationale des Sciences, les universités, les représentants gouvernementaux ainsi qu'avec les habitants qui sont soumis aux inondations régulières.

Les photos suivantes donnent un aperçu du travail sur site en Kirghizie.



Figure 13: Discussions avec les parties prenantes, mission de terrain avec les habitants

De nombreuses discussions avec des collègues internationaux à l'institut de géosciences appliquées d'Asie centrale, l'Académie des Sciences Nationale de Kirghizie, les instituts de nombreuses universités et plusieurs bureaux du PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement) sur la réduction du risque de catastrophe en Slovaquie, Kazakhstan et Kirghizie ont finalement abouti à une coopération de recherche entre la Commission Européenne et l'Asie Centrale.

GÉANT et CAREN (Central Asian Research and Education Network), qui sont pilotés par DANTE (Delivering of Advanced Network Technology to Europe) ont récemment annoncé le projet de l'université de Vienne *EURASCLIMPACT* comme une étude de cas de la recherche paneuropéenne par le réseau internet. (fig. 14).

Tracking Kyrgyzstan's melting glaciers

EU-Central Asian collaboration relies on high-speed GÉANT and CAREN research networks to monitor climate change and provide early flood warning

Fig.14: Perspectives d'interface entre la science et les parties prenantes: le projet EURAS-CLIMPACT choisi comme étude de cas par CAREN (Central Asian Research Network) et par GÉANT

Références :

- LEBER, D. (2012): Hazard zonation and contingency planning – standard tools for reducing geohazard/flood risks in the European Alps.- International Conference on GLOF Risk Reduction “Reducing risks and ensuring preparedness”, 5-7 December 2012, Abstracts, p. 43, Paro, Bhutan.
- HÄUSLER, H., KOPECNY, A. & LEBER, D. (2013): The Northern Inylchek type of glacier surge (Central Tien Shan, Kyrgyzstan).
- HÄUSLER, H., KOPECNY, A. & LEBER, D. (2013): Change detection of glaciers in the Tien Shan (Kyrgyzstan).
- KOPECNY, A. (2013): Geologische und glazialgeomorphologische Untersuchungen im Bereich des Inylchek Gletschers (Tien Shan, Kirgisische Republik). Unveröffentlichte Masterarbeit, Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie (Department für Umweltgeowissenschaften), Wien.
- KOPECNY, A., NG, F., HÄUSLER, H. & LEBER, D. (2013): Estimation of recent deposition rates in a proglacial lake – example from the Upper Lake Merzbacher, Central Tien Shan (Kyrgyz Republic).



CIRCLE 2

CLIMATE IMPACT RESEARCH
& RESPONSE COORDINATION
FOR A LARGER EUROPE
EU FP7 ERA-NET

www.circle-era.eu

<http://www.circle-era.eu/np4/28>

