

Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes : Impacts observés et potentiels sur les systèmes physiques et socio-économiques

Benjamin Einhorn^{1*}, Nicolas Eckert², Christophe Chaix³, Ludovic Ravanel⁴, Philip Deline⁴, Marie Gardent⁴, Vincent Boudières¹, Didier Richard², Jean-Marc Vengeon¹, Gérald Giraud⁵, Philippe Schoeneich⁶

¹ Pôle Alpin d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PARN), Grenoble

² UR ETNA, Irstea Grenoble / Université Grenoble Alpes, BP 76, 38 402 Saint Martin d'Hères, France

³ Mission Développement Prospective (MDP) / Observatoire savoyard du Changement Climatique (OsCC), Chambéry

⁴ Laboratoire EDYTEM, UMR 5204 CNRS / Université Savoie Mont-Blanc, Le Bourget-du-Lac

⁵ Météo-France – CNRS, CNRM-GAME UMR 3589, CEN, Grenoble, France

⁶ Laboratoire PACTE, UMR 5194 CNRS / Université Joseph Fourier, Grenoble

* Email : benjamin.einhorn@ujf-grenoble.fr

Résumé

Sous l'effet des changements climatiques, les territoires de montagne alpins enregistrent des évolutions rapides et manifestes qui suscitent l'attention croissante des populations, des scientifiques et des gestionnaires. Pour mieux faire face aux aléas et aux vulnérabilités spécifiques à ces territoires, l'adaptation de la prévention des risques naturels aux changements climatiques est aujourd'hui prescrite par les politiques publiques nationales et communautaires en vigueur dans l'arc alpin. Cet article passe en revue les progrès récents dans la connaissance des changements perçus, mesurés et projetés à l'échelle des Alpes françaises dans i) les paramètres climatiques, ii) la cryosphère, les hydrosystèmes et la morphodynamique des versants, iii) les aléas naturels et iv) les risques induits. Cette synthèse renouvelée fournit un aperçu des résultats des projets de recherche, de coopération et de capitalisation sur ces thématiques, acquis pour la plupart au cours de la période de programmation 2007-2013, en s'appuyant sur des bases de données et plateformes de connaissances développées par différents opérateurs scientifiques et techniques dans le cadre de l'arc alpin. Elle est illustrée par une méta-analyse d'exemples déjà publiés de chroniques d'activité d'aléas hydro-gravitaires, accompagnées des paramètres climatiques identifiés comme « prédicteurs ».

Mots-clés

Risques naturels, observation, projection, adaptation

Introduction

Les territoires de montagne sont particulièrement concernés par les effets des changements climatiques. Aux impacts observés et potentiels sur des aléas naturels très divers se combine l'augmentation des vulnérabilités dans le contexte du changement global (Beniston *et al.*, 1996 ; Boudières *et al.*, 2013).

Depuis quelques années, ces changements rapides suscitent une attention et des préoccupations accrues de la part des populations, des scientifiques et des gestionnaires du territoire et des risques naturels dans les Alpes. Un grand nombre de projets de recherche et de coopérations territoriales y ont été consacrés au sein de programmes européens, nationaux et régionaux (Tabs. 1 et 2).

Nom / acronyme	Intitulé et régions concernées	Périodes de programmation	Site internet
Echelon international			
BELMONT FORUM	Appel à propositions "Mountains as Sentinels of Change" du "Belmont Forum Collaborative Research Action"	Lancé en 2015	http://igfagcr.org/cra-2015-mountains-as-sentinels-of-change
WCRP	World Climate Research Programme : Programme mondial de recherches sur le climat de l'Organisation météorologique mondiale	Créé en 1980	www.wcrp-climate.org
Echelon européen			
ALCOTRA	Programme transfrontalier France-Italie (précédentes périodes de programmation : 1989–1999 ; 2000–2006 ; 2007–2013)	2014–2020	www.interreg-alcotra.org
ESPACE ALPIN	Programme transnational Espace Alpin, existe depuis 2000, concerne les sept pays de l'arc alpin et couvre les deux Régions Rhône-Alpes et PACA	Idem depuis 2000	www.alpine-space.eu
FRANCE-SUISSE	Programme transfrontalier France-Suisse	Idem	www.interreg-francesuisse.org
MED	Couvre les régions côtières et méditerranéennes de neuf états membres de l'Union européenne.	Idem	www.programmemed.eu
PCRD	Programme Cadre de recherche et Développement et d'Innovation (Horizon 2020, ou 8 ^{ème} PCRD) Principal instrument européen de la Recherche Développement et de l'Innovation.	Depuis 1984	www.horizon2020.gouv.fr
CORDEX	European branch of the international CORDEX initiative, sponsored by the World Climate Research Program (WRCP)	Depuis 2009	www.euro-cordex.net (for Europe)
COST	Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique Programme financé par la Commission Européenne, direction Générale de la Recherche, via le PCRD	Idem	www.cost.eu
Echelon national			
ANR	Agence Nationale de la Recherche	Depuis 2005	www.agence-nationale-recherche.fr
GICC	Gestion des Impacts du Changement Climatique	Depuis 1999	www.gip-ecofor.org/gicc
MEDDE	Projets et actions financés notamment par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR)	Ponctuels	www.developpement-durable.gouv.fr
RGC&U	Réseau Génie Civil et Urbain (rattaché à l'ANR en 2005)	1999-2005	www.agence-nationale-recherche.fr
IREX	Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (cf. dispositif « Projet National »)	2015-2020	www.irex.asso.fr
Echelon interrégional			
POIA	Programme Opérationnel Interrégional des Alpes (fait suite à la précédente programmation : 2007-2013)	2014-2020	http://programmes-europeens-2014-2020.regionpaca.fr (pdf)
SDA	Science-Décision-Action pour la prévention des risques naturels (sous-programme du POIA)	2015-2020	www.risknat.org/sda
Echelon régional			
CPER	5 thématiques sont proposées à la contractualisation pour les futurs Contrats de Projets Etat-Région (2014-2020) : i) l'enseignement supérieur, la recherche et l'innovation ; ii) la couverture du territoire par le très haut débit et développement des usages du numérique ; iii) l'innovation, les filières d'avenir et l'usine du futur ; iv) la mobilité multimodale ; v) la transition écologique et énergétique.	2014–2020	www.datar.gouv.fr/contrats-etat-regions
ARC-Environnement Rhône-Alpes (ex Cluster Environnement)	L'ARC Environnement en Rhône-Alpes vise à aider la région à « maintenir l'équilibre fondamental, mais fragile, du développement durable en s'appuyant sur le secteur de la recherche et de l'innovation, particulièrement actif dans les thématiques de l'ingénierie environnementale et de l'étude des relations environnement-santé ».	Depuis 2012	www.arc.rhonealpes.fr
LabEx OSUG@2020	Laboratoires d'Excellence (LabEx), « OSUG@2020, stratégies innovantes pour l'observation et la modélisation des systèmes naturels » : projet lauréat financé par le programme Investissements d'Avenir lancé par l'État et mis en oeuvre par l'ANR	2011-2020	www.osug.fr/labex-osug-2020
Echelon infrarégional			
PGRN/CG38	Programme départemental du Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PGRN) financé par le Conseil général de l'Isère	1989-2010	www.risknat.org/pgrn-cr38

Tableau 1 : Principaux programmes de recherche internationaux, européens et nationaux sur le changement climatique et les risques naturels intéressant les Alpes françaises.

Programme	Projet	Intitulé	Durée	Site internet
Echelon européen				
5 ^e PCRD	GLACIORISK	Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions	2001-2003	http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr
	PRUDENCE	Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects	2001-2004	http://prudence.dmi.dk/
	STARDEX	Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions	2002-2005	www.cru.uea.ac.uk/projects/star dex
6 ^e PCRD	ENSEMBLES	Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts	2004-2009	www.ensembles-eu.org
7 ^e PCRD	ACQWA	Assessing Climate Impacts on the Quantity and quality of WAter	2008-2013	www.acqwa.ch
	ConHaz	Costs of Natural Hazards	2010-2012	http://conhaz.org
	EURO4M	European Reanalysis And Observations For Monitoring	2010-2014	www.euro4m.eu
	EUROPIAS	European Provision Of Regional Impacts Assessments on Seasonal and Decadal Timescales	2012-2015	www.europias.eu
	Safeland	Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies	2009-2013	www.safeland-fp7.eu
WRCP	EURO-CORDEX	European Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment - European Domain	2009	www.euro-cordex.net
CIRCLE Mountain	ARNICA	Assessment of Risks on transportation Networks resulting from slope Instability and Climate change in the Alps	2010-2013	www.circlemontagne.fr
	Changing RISKS	Changing pattern of landslide risks as response to global changes in mountain areas	2010-2013	www.circlemontagne.fr
COST	FloodFreq	European Procedures for Flood Frequency Estimation	2010-2014	www.cost-floodfreq.eu
	HOME	Advances in homogenisation methods of climate series	2007-2012	www.homogenisation.org

Tableau 2 : (A) Exemples de projets européens de Recherche et Développement sur le changement climatique et les risques naturels dans les Alpes.

Programme	Projet	Intitulé	Durée	Site internet
Echelon européen				
ALCOTRA	FLORA	Flood estimation and forecast in complex orographic areas for risk mitigation in the Alpine Space	2009-2012	www.risknet-alcotra.org (info)
	GlaRiskAlp	Risques glaciaires dans les Alpes occidentales	2009-2012	www.glariskalp.eu
	IFP FR-IT	Interreg Forêts de protection – Composante France-Italie	2007-2011	www.interreg-forets-protection.eu
	PERMAdatROC	Elaboration d'une base de données et expérimentation de méthodes de mesure des mouvements gravitaires et des régimes thermiques des parois rocheuses à permafrost en haute montagne	2006-2008	www.risknet-alcotra.org (info)
	PICRIT	Protection des infrastructures critiques transfrontalières pour la sécurité civile	2012-2013	www.picrit.eu
	PIT EMB - P4HS	Plan Intégré Transfrontalier Espace Mont-Blanc – Volet Éducation à l'environnement	2010-2012	http://pit.espace-mont-blanc.com
	RiskNat	Gestion en sécurité des territoires de montagne transfrontaliers	2009-2012	www.risknat-alcotra.org
	RiskNET	Réseau transfrontalier sur les risques naturels	2013-2015	www.risknet-alcotra.org
	STRADA	Stratégies d'adaptation au changement climatique pour la gestion des risques naturels dans la région frontalière	2010-2013	www.progettostrada.net
	FRANCE-SUISSE	HAUT RHÔNE IFP FR-CH	Le Haut-Rhône et son bassin versant montagneux : pour une gestion intégrée de territoires transfrontaliers Interreg Forêts de protection – Composante France-Suisse	2005-2008 2007-2011
ESPACE ALPIN	ALP FFIRS	Alpine Forest Fire _warning System	2009-2012	www.alpfirs.eu
	AdaptAlp	Adaptation to Climate Change in the Alpine Space	2008-2011	www.adaptalp.org
	C3-Alps	Capitalising climate change knowledge for adaptation in the alpine space	2012-2014	www.c3alps.eu
	ClimChAlp	Climate change, impacts and adaptation strategies in the Alpine Space	2006-2008	Site web non maintenu
	CL SIP	Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space	2008-2011	www.clisp.eu
	MANFRED	Management strategies to adapt Alpine Space forests to climate change risk	2009-2012	www.manfredproject.eu
	PARAmount	Improved accessibility: reliability and security of alpine transport infrastructure related to mountainous hazards in a changing climate	2009-2012	www.paramount-project.eu
	PermaNET	Permafrost long-term monitoring network	2008-2011	www.permanet-alpinespace.eu
	START_it_up	State-of-the-Art in Risk Management Technology: Implementation and Trial for Usability in Engineering Practice and Policy	2013-2014	http://startit-up.eu
	WikiAlps	A wiki for capitalising on spatial-development projects	2013-2014	www.wikialps-project.eu

Tableau 2 (suite) : (B) Projets européens de recherche et de coopération territoriale sur le changement climatique et les risques naturels dans les Alpes.

Programme	Projet	Intitulé	Durée	Site internet
Echelon national				
ANR	MONISNOW	Monitoring Snow in a changing climate	2011-2015	www.agence-nationale-recherche.fr
	MOPERA	Modélisation Probabiliste pour l'Étude du Risque d'Avalanche	2010-2013	www.avalanches.fr/mopera-projet
	Pygmalion	Paleohydrology and Human Climate Environment Interactions in the Alps	2007-2012	http://edvtem.univ-savoie.fr/...
	RIWER 2030	Climat Régionaux et incertitudes, ressources en eau et énergétiques associées de 1960 à 2030	2009-2011	www.lthe.fr/RIWER2030
	SAMCO	Adaptation de la société aux risques en montagne dans un contexte de changement global	2013-2017	www.anr-samco.com
	SCAMPEI	Scénarios Climatologiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes	2009-2011	www.cnrm.meteo.fr/scampe
	SLAMS	Séchilienne Land movement : Multidisciplinary Studies from Hazard assessment to associated risk and consequences	2010-2013	http://isterre.fr/recherche/...
Fondation MAIF	VIP-Mont-Blanc	Rates of the processes controlling the morphologic and environmental changes in the Mont-Blanc massif	2014-2019	http://vip-montblanc.osug.fr/
	DENDROGLISS PERMAFROST	Reconstitution de l'activité de glissements de terrain par dendrogéomorphologie Analyse des risques induits par la dégradation du permafrost	2008-2011 2007-2010	www.fondation-maif.fr/...
GICC	ADAMONT	Impacts du changement climatique et Adaptation en territoire de Montagne	2015-2017	www.gip-ecofor.org/gicc/...
	DECLIC	Drôme : Eau, Climat et Impacts liés aux Changements	2010-2012	http://declic.ujf-grenoble.fr
	DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements	2008-2011	www.drias-climat.fr
	GICC Rhône	Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion	1999-2004	www.gip-ecofor.org/gicc/...
MEDDE	R ² D ² 2050	Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050	2010-2013	https://r2d2-2050.cemagref.fr
	ECANA	Etude Climatologique de l'Activité Avalancheuse Naturelle	2009-2016	www.avalanches.fr/projet-ecana
	EXPLORE 2070	Eau et changement climatique	2010-2012	www.developpement-durable.gouv.fr/...
IREX / RGC&U	C2ROP	Chutes de Blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection	2015-2019	www.c2rop.fr
Echelon interrégional				
POIA	GIRN Alpes	Opération interrégionale « Gestion intégrée des risques naturels dans les Alpes – Expérimentation sur sites pilotes » Essaimage de sites de GIRN dans la nouvelle programmation	2009-2014 2015-2020	www.risknat.org/girn-alpes
Echelon régional				
ARC-Environnement	AIC 2012	XXV colloque Association internationale de climatologie	2012	
	ISSW2013	Organisation de l'International Snow Science Workshop à Grenoble	2013	
	—	Influence du climat sur le déclenchement des éboulements rocheux	2013	
	—	Archives climatiques de la dernière période interglaciaire en Rhône-Alpes, et nouvelles méthodologies pour la reconstruction des paléo-températures	2015	www.arc3-environnement.rhonealpes.fr
CPER PACA	PERMARISK	Contribution à l'amélioration de la gestion de risques émergents associés à la dégradation du permafrost de montagne	2015	
	RHYTMME	Risques HYdrométéorologiques en Territoires de Montagnes et MEditerranéens	2008-2013	http://rhytmme.irstea.fr
Régions RA, LR, MP	CLIMFOUREL	Adaptation des systèmes fourragers et d'élevage péri-méditerranéens aux changements et aléas climatiques, un projet tri-régional Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées	2008-2010	http://climfourrel.agropolis.fr
Echelon infrarégional				
LabEX ITEM	CrHistAl	Crues Historiques dans les Alpes	2012-2013	www.labexitem.fr/...
LabEX OSUG@2020	MONISNOW Alpes	Monitoring Snow in a changing climate - Alpes	2012	www.osug.fr/labex-osug-2020/...
	—	Structure des précipitations orographiques en région Méditerranéenne : Mécanismes et Prévion	2012	www.osug.fr/labex-osug-2020/...
	—	Impacts environnementaux du retrait glaciaire dans le Massif du Mont Blanc : quantification des processus contemporains et perspectives d'évolutions futures	2014	www.osug.fr/labex-osug-2020/...
PGRN/CG38	Plusieurs projets	Quelques projets sur le changement climatique parmi plus de 200 projets sur les risques naturels	1989-2010	www.risknat.org/pgrn-cg38

Tableau 2 (suite) : (C) Projets de recherche nationaux et régionaux sur le changement climatique et les risques naturels dans les Alpes françaises.

Dans la continuité de synthèses antérieures (Prudent-Richard *et al.*, 2008 ; Richard *et al.*, 2010 ; Einhorn et Peisser, 2011), cet article présente les résultats majeurs des travaux récents sur ces thèmes dans les Alpes françaises, en s'appuyant sur des portails de capitalisation des connaissances (Tab. 3). Un aperçu des services d'observation existants est également présenté (Tab. 4).

Outil de capitalisation des connaissances	Site internet
Portail Alpes-Climat-Risques issu du projet ClimChAlp (Prudent-Richard <i>et al.</i> , 2008) : base de connaissances bibliographique (350 références) et lettre d'information sur le changement climatique et ses effets sur les milieux physiques et les risques naturels alpins.	www.risknat.org/alpes-climat-risques
Base Projets : documentation des résultats de la recherche sur les risques naturels alpins	www.risknat.org/baseprojets
Base de données des projets de coopération Interreg franco-italo-suisse sur les risques naturels du projet RiskNET	www.risknet-alcofra.org

Tableau 3 : Outils utilisés donnant accès aux références complètes (projets, publications) des travaux dont proviennent les résultats évoqués dans le texte.

Services d'observation et bases de données	Missions et objets d'étude	Types de données	Organismes porteurs et producteurs de données*
Observations climatiques			
Météo-France http://www.meteofrance.com/	Missions de service public de diffusion d'informations sur la météorologie et le climat. Publie notamment des bilans climatiques annuels et saisonniers	Données d'observations (<i>in situ</i> , radar, satellite), climatologie, modèles et données de prévisions et prévisions climatiques	Météo-France
Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region (HISTALP) www.zamg.ac.at/histalp/	Longues séries de paramètres climatiques couvrant l'arc alpin (« Grande Région Alpine »)	Données homogénéisées mensuelles de températures, précipitations, pression atmosphérique, ensoleillement et nébulosité	ZAMG (Autriche)
Environnement alpin			
Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat (GLACIOCLIM) www.lggee.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/	Observatoire de Recherche en Environnement de la thématique "Surfaces et Interfaces Continentales" portant sur l'étude des Glaciers et du Climat	Bilans de masse glaciaire	LGGE, Irstea
Réseau de mesure du permafrost et des processus liés au gel (PermaFRANCE)	Réseau d'observation et de suivi du permafrost de montagne français, des phénomènes liés au gel et des processus périglaciaires associés	Voir Bodin <i>et al.</i> , 2015 (ce volume)	PACTE, EDYTEM
Aléas « naturels »			
Enquête permanente sur les avalanches (EPA) www.avalanches.fr/epa_lobserver-actuelle	Dispositif régulier d'observation des avalanches en France donnant accès à un inventaire, le plus complet possible, des événements d'avalanche ayant eu lieu sur les sites observés pendant la saison hivernale (4000 couloirs à ce jour)	Base de données des événements observés pour chaque site (dates, altitudes, dépôt, caractéristiques, météo 3 jours, précédents, météo 4h, précédentes, causes, victimes, dégâts ou lieux atteints)	Irstea, ONF-RTM, MEDDE
Observatoire des Risques Naturels en Montagne du service de Restauration des Terrains en Montagne (BD RTM Evénements) http://rtm-onf.ifn.fr	Base de données sur les événements d'avalanche, inondation, crue torrentielle, ravinement, chute de bloc, glissement de terrain, affaissement et tassement par retrait	Informations sur plus de 30 000 événements, et plus de 19 000 ouvrages de protection contre les risques naturels (regroupés en 2400 dispositifs de protection)	ONF-RTM, IFN, MEDDE, Ministère de l'Agriculture
Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versants (OMIV) http://omiv.osug.fr/	Etude de la dynamique des mouvements gravitaires (endommagement, déclenchement, propagation) et de l'effet des forçages externes (climat, séismes) sur quatre sites représentatifs des mécanismes observés dans les Alpes françaises (roches tendres/denses, mouvements lents ou rapides).	Développement d'une instrumentation multidisciplinaire permanente sur chaque site, visant à caractériser : i) la cinématique de déplacement et de déformation (géodésie, inclinomètres, extensomètres, imagerie aérienne et satellitaire), ii) le comportement sismique du glissement (endommagement fragile via les microséismes et réponses aux séismes régionaux), iii) les réponses hydrauliques aux forçages météorologiques.	ISTerre, Géozur, EMMAH, IPGS-EOST, Chrono-Environnement
Surveillance Séchilienne www.versant-sechilienne.developpement-durable.gouv.fr/	Système opérationnel de surveillance du versant instable des Ruines de Séchilienne (Isère)	Données de télésurveillance : extensométrie, positionnement GPS, vitesses de déplacement...	MEDDE, CEREMA
Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie (Banque HYDRO) www.hydro.eaufrance.fr	Banque de données hydrologiques des services de l'Etat administrée et gérée par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations	Mesures de hauteur d'eau à divers pas de temps en provenance de 3 500 stations de mesure (dont 2 400 en service) implantées sur les cours d'eau français et accès aux données signalétiques des stations	MEDDE, (SCHAPI, DREAL, SPC, etc.), EDF, Irstea, compagnies d'aménagement
Service de Prévision des Crues des Alpes du Nord (« Information sur la vigilance crues ») www.vigicrues.gouv.fr	Mission réglementaire de surveillance, de prévision et de transmission de l'information sur les crues	Données des stations de mesure des hauteurs et débits liquides des principaux cours d'eau métropolitains (stockées dans la Banque HYDRO)	MEDDE, SPC Alpes du Nord (DDT38)
Base de Données sur les Incendies de Forêt en France (BDIFF) http://bdiff.ifn.fr/	Rassemble toutes les données relatives à des incendies de forêt survenus en France métropolitaine depuis l'année 1992	Données à caractère déclaratif collectées de manière complémentaire par différents services locaux (départementaux ou régionaux)	MAAPRAT, MIOMCTI, DGPAAT, IGN
Notes :			
* Acronymes : voir sites internet			

Tableau 4 : Services d'observation et de surveillance producteurs de données sur le changement climatique, les milieux physiques et les risques naturels pour les Alpes françaises.

Sur ces bases, la présente contribution passe en revue les changements observés et projetés dans : i) les paramètres climatiques, ii) la cryosphère, les hydrosystèmes et la morphodynamique des versants, iii) les aléas naturels, et iv) les risques induits sur les installations et activités anthropiques dans les Alpes françaises. Elle est illustrée par des séries temporelles d'activité d'aléas hydro-gravitaires publiées et des paramètres climatiques identifiés comme leurs prédicteurs les plus significatifs. Outre les ressources et références bibliographiques inventoriées, permettant d'approfondir cette revue, d'autres articles du volume traitant certaines thématiques abordées sont signalés.

1. Changements climatiques et impacts physiques observés

1.1 Le changement climatique mesuré

Le réchauffement du climat de la chaîne alpine est bien documenté (Tab. 5) à partir de sources variées (séries ponctuelles, réanalyses, résultats de simulation sur le passé, etc.) aux résolutions spatiales et altitudinales différentes, et couvrant différentes périodes, dont l'exploitation nécessite des bases de données homogènes. Les conclusions robustes portent essentiellement sur l'élévation générale des températures et ses effets sur les phénomènes directement liés, tels que les précipitations neigeuses ou l'évapotranspiration.

Résultat	Référence
(A) Selon une reconstitution dendroclimatologique régionale dans l'arc alpin, la dernière décennie du XX ^e siècle a été la période la plus chaude au cours du dernier millénaire, avec un réchauffement plus important et beaucoup plus rapide que, par exemple, celui reconstruit pour la période chaude médiévale.	Corona <i>et al.</i> , (2010)
(B) Les longues séries de températures homogénéisées couvrant l'arc alpin (HISTALP) montrent un réchauffement homogène de 2°C entre la fin du XIX ^e et le début du XXI ^e siècle (Auer <i>et al.</i> 2007) qui s'accélère depuis 1970, y compris en altitude. Partout, en effet, la fin des années 1980 marque un réchauffement marqué. L'altitude moyenne de l'isotherme 0°C s'est ainsi élevée de 400 m par rapport au début des années 1980 (Böhm <i>et al.</i> , 2010).	Auer <i>et al.</i> (2007) (voir réf. dans Böhm <i>et al.</i> , (2010)) ; Böhm <i>et al.</i> , (2010)

Tableau 5 : Résultats (A) de reconstitution et (B) d'observation de l'évolution pluriséculaire de la température dans les Alpes.

Dans les Alpes françaises, situées au carrefour de plusieurs influences climatiques, le réchauffement des températures après la fin des années 1980 affecte toutes les stations, avec des contrastes nord/sud peu marqués (Fig. 1). Le réchauffement de +1.8 et +2.1°C en moyenne annuelle dans les Alpes du Nord et les Préalpes depuis 1950 est plus rapide que celui observé dans les Alpes du Sud (+1.5 à +1.7°C), avec des valeurs intermédiaires dans les secteurs de transition entre ces deux domaines climatiques¹.

¹ Source : analyse des séries homogénéisées de Météo-France par MDP/OsCC. Pour les Alpes du Nord, l'OsCC fournit des bilans climatiques annuels et saisonniers (www.mdp73.fr).

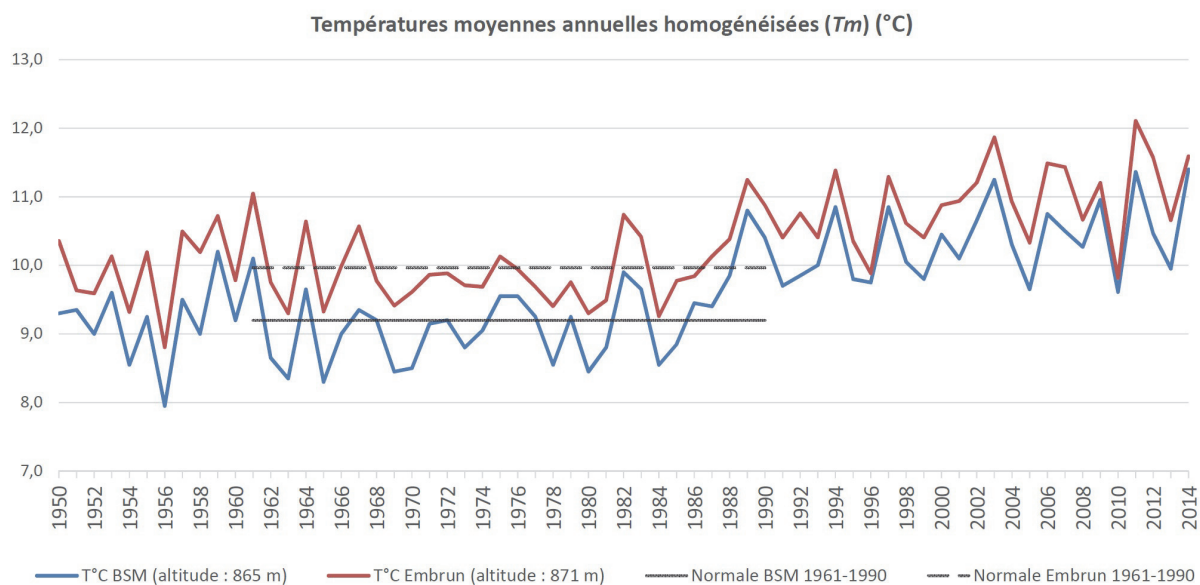


Figure 1 : Températures moyennes annuelles homogénéisées de 1950 à 2014 à Bourg-Saint-Maurice (BSM) et Embrun et normales sur la période de référence 1961-1990. Données : Météo-France ; Traitement : MDP-OsCC/PARN.

Les longues séries mensuelles dans les Alpes du Nord sur la période 1885-2007 (Dumas, 2013) montrent que le réchauffement à l'échelle annuelle s'est effectué sans amplification notable jusqu'à 1960. Puis le taux de réchauffement a augmenté au cours des dernières décennies, jusqu'à dépasser +4,0 °C/100 ans (notamment sur le printemps et l'été). Cette valeur est cohérente avec le taux de +0,4 °C/décennie pour les Alpes du Nord depuis les années 1950, supérieur à celui du reste de la France, surtout pour les températures maximales (Gibelin *et al.*, 2014). La question de la méditerranéisation du climat des Alpes du Nord se pose, ce phénomène ayant déjà été constaté le long de la vallée du Rhône et en Midi-Pyrénées (projet Climfourrel).

Les réanalyses SAFRAN² sur la période 1958-2002 (Durand *et al.*, 2009a) montrent une augmentation de la température particulièrement marquée aux altitudes moyennes (1500–2000 m, > +0,3 °C/décennie) qui s'atténue nettement au-delà de 3000 m. A très haute altitude (> 4000 m), dans le massif du Mont-Blanc, la température de l'air reconstituée par inversion de profils de température de la glace a augmenté de 0,14 °C/décennie au cours du XXe siècle (Gilbert et Vincent, 2013).

Les précipitations dans l'arc alpin présentent quant à elles une évolution bien plus hétérogène aux échelles régionale et saisonnière (Tab. 6).

Résultat	Référence
(A) A l'échelle de l'arc alpin et au cours du XX ^e siècle, les précipitations ont augmenté de 9% dans le nord-ouest de la chaîne, où la couverture nuageuse a également augmenté, tandis qu'elles ont diminué d'autant (-9 %) dans sa partie sud-est, en lien avec une baisse de la nébulosité et une tendance à l'assèchement.	Auer <i>et al.</i> (2007) (voir réf. dans Böhm <i>et al.</i> , 2010)
(B) Les données pluviométriques quotidiennes de plus de 5000 stations couvrant l'arc alpin sur la période 1971–2008 ont été interpolées dans une grille à haute résolution (5 km) intégrant plus finement l'influence complexe de la topographie et réduisant les biais traditionnels d'interpolation. Les indices étudiés soulignent l'asymétrie de la distribution en fréquence des précipitations quotidiennes entre les régions du nord des Alpes, où les jours pluvieux (> 1mm) sont plus fréquents, et leur flanc sud où ils sont moins fréquents mais en moyenne plus intenses.	Isotta <i>et al.</i> (2014)

Tableau 6 : Résultats (A) de reconstitution (HISTALP) et (B) d'observation de l'évolution pluriséculeaire des précipitations et de la nébulosité dans la région alpine.

² Système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface : www.drias-climat.fr/accompagnement/section/137

Dans les Alpes françaises, les précipitations annuelles moyennes observées et simulées par SAFRAN, ainsi que les séries climatiques homogénéisées de Météo-France, ne présentent pas de tendances statistiquement significatives (Durand *et al.* 2009a), sinon une baisse des précipitations hivernales dans les Alpes internes (Haute Maurienne, Queyras), qui atteint 30% entre les périodes climatiques 1961-1990 et 1981-2010³.

Concernant les extrêmes de précipitations, il est difficile de conclure pour les Alpes. En effet, si une tendance à la hausse variable selon les régions a été rapportée pour l'Europe, avec une réduction médiane de -21% de la période de retour des événements extrêmes (van den Besselaar *et al.*, 2013), les données de Météo-France n'indiquent pas d'augmentation des pluies extrêmes dans le Sud-Est de la France⁴.

1.2 Impacts observés sur la cryosphère alpine

Sous l'effet des changements climatiques, l'environnement alpin enregistre des évolutions rapides et manifestes : diminution de l'enneigement, recul des glaciers, dégradation du permafrost, remontée des espèces en altitude et latitude, réchauffement des lacs et des rivières, etc. Les impacts rapportés en haute montagne résultent en premier lieu des effets de l'augmentation de la température, qui contrôle très largement les alternances gel/dégel, le ratio pluie/neige ou la position en altitude du couvert neigeux et de la ligne d'équilibre glaciaire (LEG). Ces éléments contrôlent en grande partie le régime hydrologique, la dynamique végétale et, dans une moindre mesure du fait de la complexité des systèmes, les processus d'érosion *s.l.* dans les bassins versants.

L'enneigement à 1800 m dans les Alpes françaises a présenté une forte variabilité spatiale de la fin des années 1950 jusqu'au milieu des années 1980, après quoi il est devenu moins variable d'un massif à l'autre avec une diminution des valeurs moyennes et de l'amplitude des valeurs extrêmes (Durand *et al.*, 2009b). L'épaisseur de neige en début d'hiver a connu une forte diminution à basse et moyenne altitude à partir de la fin des années 1980 alors qu'elle a augmenté en haute altitude (2700 m).

Les glaciers sont le marqueur le plus visible du réchauffement passé et de son accélération récente. Une reconstitution cartographique multisource de l'emprise des glaciers des Alpes françaises a permis d'évaluer son évolution diachronique au cours des dernières décennies (projet GlaRiskAlp, Tab. 2). Leur surface à la fin des années 2000 (275 km²) a diminué de près de 20% par rapport à 1985-86 (340 km²) et de 26% par rapport aux années 1967-71 (370 km² ; Gardent *et al.*, 2014), en réponse au fort réchauffement évoqué plus haut (Fig. 2). La mesure la plus directe du contrôle climatique sur la dynamique des glaciers reste celle du bilan de masse. Celui-ci n'existe que pour quelques glaciers, principalement ceux suivis par l'observatoire GLACIOCLIM (Tab. 4 ; Vincent, 2002). Les variations saisonnières du glacier de Sarennes depuis 1949 quantifient ainsi fidèlement l'évolution des chutes de neige hivernales et de la température estivale à haute altitude (Thibert *et al.*, 2013).

³ Cf. Note 1.

⁴ <http://pluiesextremes.meteo.fr/>

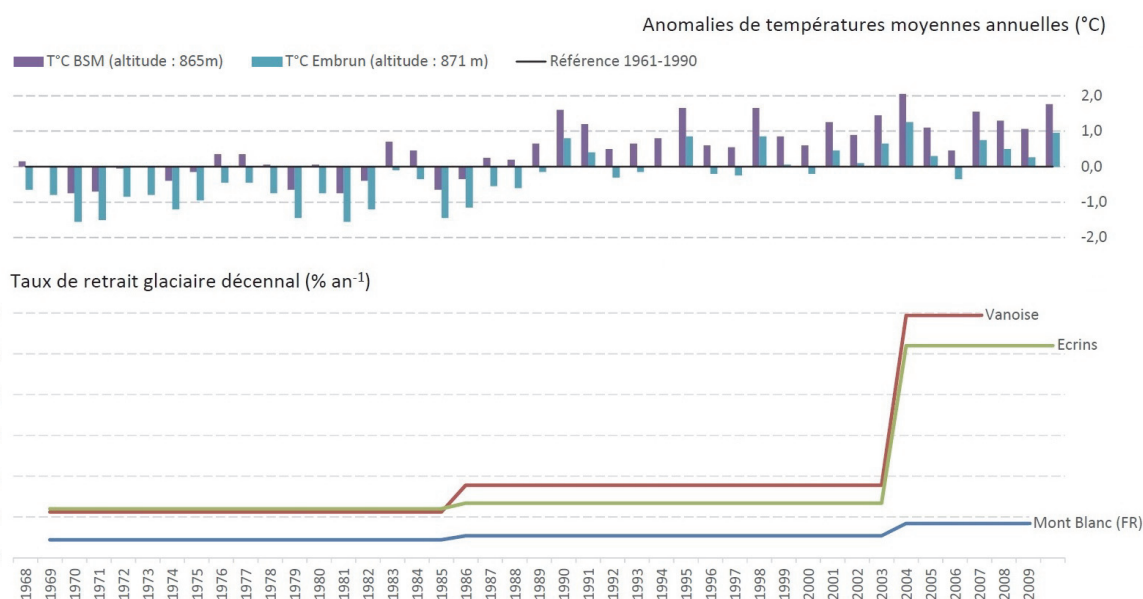


Fig. 2 : (A) Anomalies moyennes annuelles des températures à Bourg-Saint-Maurice et Embrun sur la période 1967-2010 par rapport à la normale 1961-1990 (cf. Fig. 1). (B) Estimation des changements décennaux de l'extension des glaciers dans les principaux massifs des Alpes françaises pour différentes périodes de 1967/71 à 2006/09 en % par an (Gardent *et al.*, 2014).

L'imagerie satellitaire permet de documenter les évolutions de manière spatialement plus continue. Les données sur 43 glaciers des Alpes françaises montrent une augmentation de l'altitude moyenne de la Ligne d'Équilibre Glaciaire (LEG) de 170 m sur la période 1984-2010, concomitante d'une augmentation de 150 jours du cumul de degrés-jours positifs à 3000 m d'altitude, alors que les précipitations hivernales sont restées stables (Rabatel *et al.*, 2013). Ces résultats soulignent l'influence prépondérante de l'augmentation de la température dans l'évolution récente des glaciers alpins, malgré la variabilité due au contexte topographique (Cossart, 2013).

Enfin, la mise en place de réseaux d'observation à long terme (projet PermaNET, PermaFRANCE) marque un progrès dans la connaissance et le suivi de la distribution du permafrost, de son évolution thermique et des processus associés à sa dégradation (cf. Bodin *et al.*, ce volume).

1.3 Impacts observés sur les aléas naturels

Les projets de recherche (Tab. 2) et les programmes d'observation à long terme (Tab. 4) ont livré des résultats significatifs sur l'évolution de l'activité des aléas naturels au cours des dernières décennies.

Crués des rivières alpines

Les analyses menées à l'échelle de régions hydro-climatiques homogènes dans le projet AdaptAlp⁵ suggèrent que les tendances qui affectent les rivières alpines dépendent de leur régime hydrologique. Seules les rivières à régime nival et glaciaire connaissent une augmentation de l'intensité et du volume de leurs crués et une évolution de leur saisonnalité, avec une onde de fonte plus précoce et longue (Bard *et al.*, 2012).

⁵ Les séries de données analysées qui portent sur 177 stations alpines ont été versées à la base internationale de données du Global Runoff Data Center (GRDC) www.bafg.de/GRDC

Avalanches de neige

Les avancées méthodologiques des projets MOPERA et ECANA ont permis de progresser dans la connaissance des fluctuations de l'activité avalancheuse et de son contrôle climatique (Eckert *et al.*, 2010a & b ; 2013). Un minimum relatif des altitudes d'arrêt atteintes a pu être identifié autour de 1980, suivi par une remontée en altitude marquée (Fig. 3A). La diminution sur la période 1960-1980 correspond à des hivers plus froids et neigeux, et la remontée des années 1980-2005 correspond à la période de réchauffement marqué. L'influence des hivers plus froids et neigeux enregistrés depuis 1998 est nette (Fig. 3C).

Ce schéma global masque des évolutions différentes selon l'altitude (Lavigne *et al.*, 2015). A basse altitude (< 2000 m), la réduction d'activité (nombre d'avalanches) depuis 1980 a été drastique, alors qu'elle a récemment augmenté à haute altitude, peut-être en lien avec le possible accroissement de la variabilité climatique hivernale.

Crues et laves torrentielles

L'analyse statistique de plus de 500 événements répertoriés depuis 1970 dans la base de données du RTM (Tab. 4 ; projet ARNICA) a montré le rôle essentiel joué par les variables climatiques à l'échelle régionale dans la probabilité d'occurrence des laves torrentielles. Dans certains secteurs, l'augmentation de la fréquence des laves torrentielles depuis la fin des années 1980 (Fig. 4A ; Jomelli *et al.*, in press) serait un effet du réchauffement estival qui entraîne plus d'effets convectifs et donc d'orages estivaux (Fig. 4B). Dans d'autres secteurs, le contrôle de la temporalité des laves torrentielles par celle de la recharge sédimentaire paraît l'emporter sur son contrôle par le climat (Garitte *et al.*, 2007).

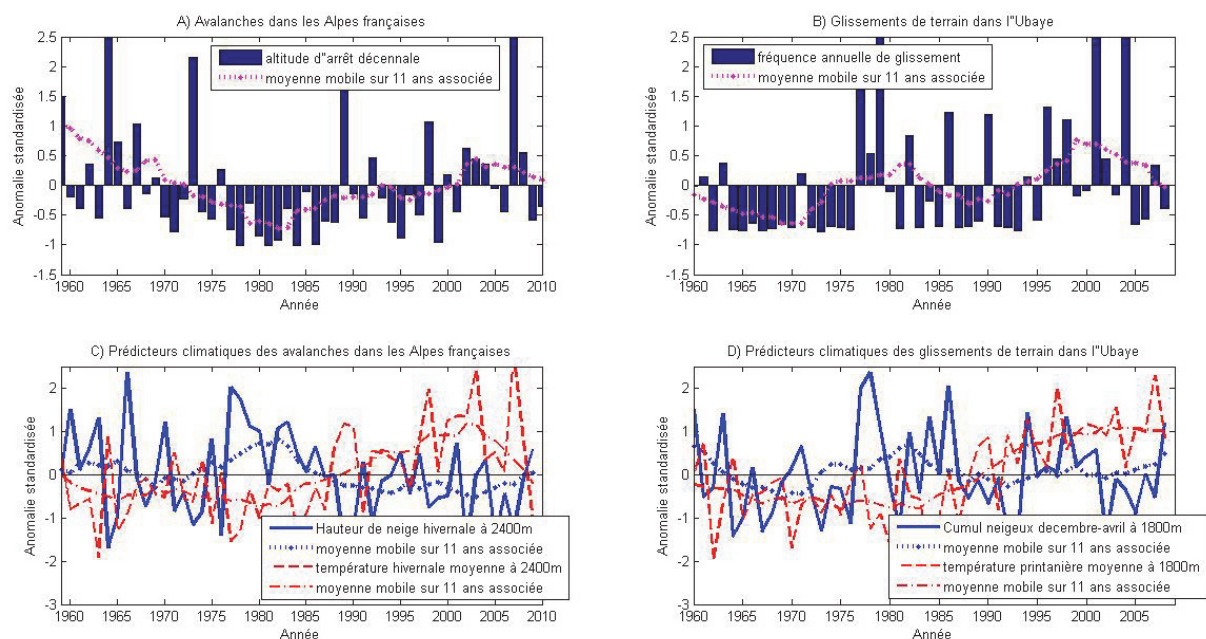


Figure 3 : Réponse de deux aléas aux changements récents de facteurs nivo-météorologiques hivernaux. (A) Altitude d'arrêt décennale des avalanches dans les Alpes françaises et (C) prédicteurs identifiés (Eckert *et al.*, 2013). (B) Fréquence annuelle de glissements de terrain dans l'Ubaye et (D) prédicteurs identifiés (Lopez Saez *et al.*, 2013). Le calcul d'anomalie est effectué par rapport à la période d'étude considérée.

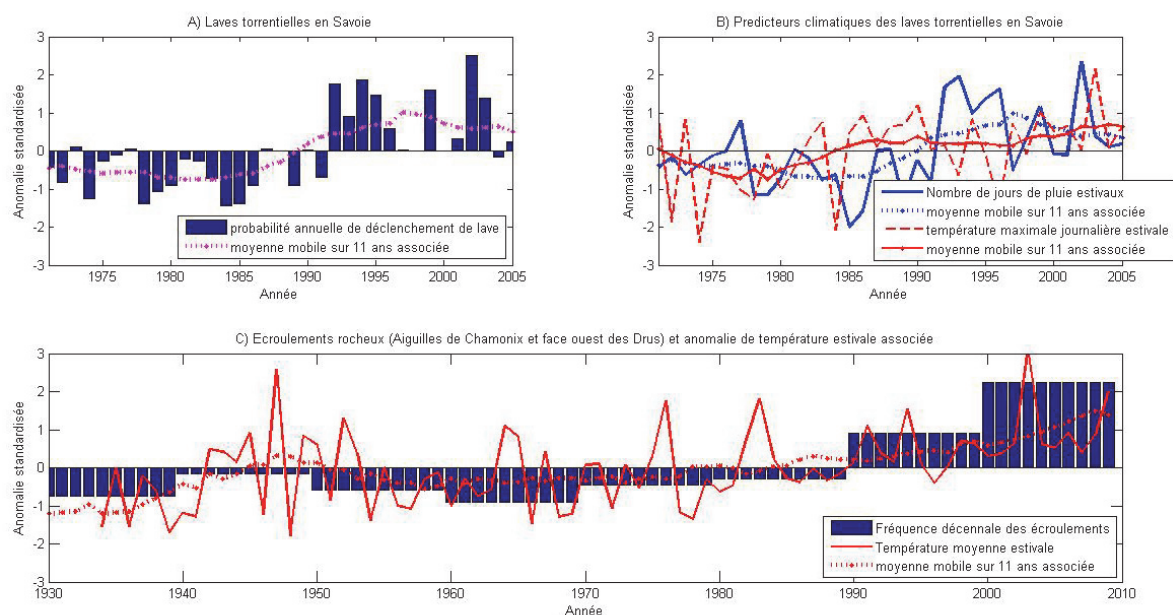


Figure 4 : Réponse de deux aléas aux changements récents de facteurs météorologiques estivaux. (A) Fréquence annuelle de lave torrentielle en Savoie et (B) prédicteurs identifiés, (Jomelli *et al.*, in press). (C) Nombre d'éroulements rocheux dans les Aiguilles de Chamonix et les Drus et anomalie de température associée (Ravel et Deline, 2011). Le calcul d'anomalie est effectué par rapport à la période d'étude considérée.

Des reconstitutions de chroniques de crues documentent également l'activité des processus torrentiels sur des échelles de temps plus longues (Tab. 7).

Projets	Principaux résultats	Référence
Pygmalion (ANR)	Des reconstitutions de chroniques de crues à partir d'archives lacustres à l'échelle centennale à millénaire suggèrent que sur l'ensemble des Alpes françaises la fréquence des crues augmente en période froide, probablement en lien avec une intensification des flux d'ouest et de l'activité dépressionnaire. De plus, on observe une évolution régionale différenciée de l'activité torrentielle en fonction des forçages prédominants : l'intensité des crues augmente également au cours de périodes froides dans les Alpes du Sud en lien apparent avec des phases négatives de l'Oscillation Nord Atlantique, tandis que dans les Alpes du Nord l'intensité augmente aussi au cours des périodes plus chaudes.	Wilhelm <i>et al.</i> (2012) et références
DENDROGLISS, ACQWA, PGRN	Quelques reconstructions dendrogéomorphologiques d'activité des crues torrentielles sont disponibles dans les Alpes françaises. Par exemple, dans le cas du torrent du Manival (Isère) où cette méthode a permis d'identifier 13 événements de lave torrentielle au cours de la période 1931–2008, les résultats démontrent que la distribution temporelle des laves torrentielles n'a pas varié de manière significative depuis le début du 20ème siècle. Cette étude montre, d'autre part, que l'analyse de la distribution spatiale des arbres perturbés peut contribuer à identifier des chenaux secondaires de laves torrentielles ainsi que des points de divagation potentielle.	Lopez Saez <i>et al.</i> (2011)

Tableau 7 : Exemples de reconstitution de l'activité passée des crues torrentielles.

Glissements

Une importante campagne dendrogéomorphologique menée dans l'Ubaye (projet DENDROGLISS) a permis d'évaluer une fréquence régionale des glissements superficiels (Fig. 3B ; Lopez Saez *et al.*, 2013). Les phases d'activation, plus nombreuses à partir de la fin des années 1970, semblent directement liées à des cumuls neigeux hivernaux importants et à des anomalies positives de température (Fig. 3D), alors que Malet *et al.* (2007) avaient conclu à l'absence de corrélation entre

cumuls de pluie et activité des glissements dans le même secteur. Aucune tendance n'a été mise en évidence pour les glissements profonds (pour lesquels les données restent rares), malgré leur sensibilité plus ou moins avérée aux forçages hydro-climatiques (Tab. 8).

Projet	Principaux résultats	Référence
CEREGE (soutien Région PACA)	Pour plusieurs grands glissements de terrain des Alpes Maritimes, les datations à l'aide de la méthode des isotopes cosmogéniques montrent des phases synchrones de déclenchement il y a environ 4000 ans, possiblement liées à un forçage climatique.	Zerathe <i>et al.</i> (2013)
SLAMS (ANR)	Dans le cas du versant instable de Séchilienne, l'évolution des vitesses de déplacement mesurées par le système de surveillance depuis 1985 ne montre pas de lien apparent avec l'évolution des paramètres de température ou de précipitations. Cependant, les variations intra-annuelles saisonnières sont synchrones des précipitations. Des analyses par ondelettes ont montré que la déstabilisation du versant est davantage liée à la pluie efficace qu'à la précipitation brute (pluie + neige) et implique donc des processus hydrogéologiques. En raison de la dégradation progressive de ses propriétés mécaniques, ce versant instable est, depuis quelques années, devenu plus sensible et réactif aux événements de courte durée, alors que les variations saisonnières sont moins marquées.	Vallet <i>et al.</i> (2013)

Tableau 8 : Exemples de reconstitution et d'observations des grandes instabilités de versant.

Éboulements et chutes de blocs

Au-dessous de l'étage périglaciaire, aucun impact tangible sur les écroulements et chutes de blocs n'est démontré à ce jour, malgré une augmentation apparente de leur incidence sur les routes de montagne signalée en Isère, Savoie et Haute-Savoie (Einhorn et Peisser, 2011 ; Wurtz, com. pers.).

Aléas d'origine glaciaire et périglaciaire

Un nombre croissant d'études vient conforter le lien empirique entre l'évolution rapide constatée de la cryosphère et la recrudescence des phénomènes de déstabilisation en haute montagne (Ravel, 2009), notamment dans les domaines glaciaires et périglaciaires (Bodin *et al.*, ce volume). Ainsi, les reconstitutions dans des secteurs à permafrost du massif du Mont Blanc montrent-elles une corrélation entre la fréquence décennale des écroulements rocheux (> 100 m³) et le réchauffement enregistré depuis le début du XXe siècle (Fig. 4C ; Ravel et Deline, 2011).

Aucune tendance n'a pu être fermement établie pour les aléas d'origine glaciaires car, hormis les chutes de séracs de faible volume, ils surviennent relativement rarement. Les modifications observées dans la géométrie et le régime thermique des glaciers sont néanmoins susceptibles de modifier les conditions de formation de ce type d'aléas. Des recherches sont menées pour inventorier les glaciers à risques, notamment suivre dans le temps l'évolution des séracs volumineux et détecter la présence de poches d'eau intraglaciaires dont la vidange brutale peut déclencher des laves torrentielles aux conséquences catastrophiques (Gilbert *et al.*, 2012 ; Vincent *et al.*, 2012). Il s'agit d'autre part d'évaluer les risques liés aux instabilités qui peuvent prendre naissance dans les marges récemment déglacées (Gardent, 2014) : vidange brutale de lacs juxta-, supra- et proglaciaires (Vincent *et al.*, 2010), augmentation du stock de matériaux mobilisables par les torrents, processus en cascades pouvant engendrer des phénomènes dévastateurs.

Projets	Principaux résultats	Référence
RiskNat, GlaRiskAlp et ACQWA	La rupture de poches d'eau glaciaires constitue l'un des dangers aux conséquences potentielles les plus catastrophiques dans les Alpes (Catastrophe de St-Gervais en juillet 1892). Les recherches initiées suite à la crise liée à la détection d'une poche d'eau dans le glacier de Tête Rousse (Haute-Savoie) ont montré l'influence possible du régime thermique de celui-ci sur la formation de la poche d'eau.	Gilbert <i>et al.</i> (2012)

GlaRiskAlp	<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des extensions actuelle et ancienne des glaciers à l'échelle régionale des Alpes occidentales et cartographie géomorphologique des secteurs déglacés depuis la fin du Petit-Âge-Glaciaire. • Elaboration d'une typologie des aléas glaciaires • Elaboration d'une méthodologie d'évaluation de la prédisposition aux aléas des secteurs englacés et récemment déglacés et test sur 4 sites pilotes (inventaire des processus et de leurs combinaisons éventuelles, quantification des volumes en jeu, caractérisation de la stabilité des matériaux). • Sur 4 sites pilotes : acquisition de données et test de méthodes sur la dynamique glaciaire, les chutes de séracs et les conditions de formation des poches d'eau glaciaires (glaciers de Taconnaz, des Grandes Jorasses, de Tête Rousse et de l'Argentière). 	Gardent (2014)
------------	---	----------------

Tableau 9 : Exemple de travaux récents sur les aléas d'origine glaciaire.

Les évolutions du climat, leurs effets sur l'environnement alpin et les impacts sur les aléas naturels observés dans les Alpes françaises montrent ainsi l'existence de mécanismes de contrôle climatique exercé par certains paramètres (thermiques *a minima*) sur les conditions de formation de certains types d'aléas. Sans étayer une vision cédant à un catastrophisme excessif, ces conclusions invitent néanmoins à une certaine vigilance vis-à-vis de l'évolution future des phénomènes dont la « sensibilité climatique » est avérée.

2. Impacts futurs sur les systèmes physiques

2.1 Le climat alpin des prochaines décennies

De nombreux projets ont proposé des projections climatiques pour l'ensemble de l'espace alpin, utilisées ensuite en entrées d'études d'impacts transversales ou ciblées (Tab. 10). Pour les Alpes françaises, un relatif consensus existe sur l'ampleur du réchauffement futur : +1,5°C au milieu du XXI^e siècle et de +2 à +4°C à la fin du siècle par rapport à la période de référence 1960-1990, avec des variations spatiales et/ou saisonnières.

En matière de précipitations en revanche, on note une quasi-absence de tendance prévisible dans les cumuls de précipitations à différentes échelles de temps, sinon un léger déficit de précipitations d'automne (Rousselot *et al.*, 2012), voire d'été (modèle Aladin de Météo-France/CNRM, projet DRIAS) pour la fin du siècle. Si une augmentation en intensité et/ou en fréquence des précipitations extrêmes est projetée à l'échelle globale (IPCC, 2012), son ampleur demeure incertaine à l'échelle des Alpes françaises, notamment concernant les pluies convectives.

Selon les résultats des projets SCAMPEI et ECANA, du fait du changement dans le ratio pluie-neige lié au réchauffement en cours, la diminution de l'enneigement moyen actuellement observée va se poursuivre au XXI^e siècle dans l'ensemble des Alpes françaises. Si les secteurs situés au-dessus de 1800-2100m devraient rester relativement préservés vers 2050 avec de faibles diminutions variant selon le scénario économique et l'exposition considérés, cette altitude critique devrait ensuite s'élever à 2400m pour le scénario le plus optimiste, et davantage encore pour les autres *scenarii*. Ces variations quantitatives s'accompagneront de modifications qualitatives, avec par exemple l'apparition progressive d'un manteau neigeux humide au cœur de l'hiver à haute altitude (Castebrunet *et al.* 2014).

Projet Types de modèles et scénarios utilisés Principaux résultats	Site internet
Europe	
ENSEMBLES (FP6) Projections régionales multi-modèles sur l'Europe et sur les Alpes (résolution spatiale maximale de 25 km) pour le XXI ^e siècle (2070–2099) basées sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) SRES (Special Report on Emission Scenario) A1B du GIEC. Pour la région alpine, les modèles s'accordent sur une augmentation de l'intensité des événements extrêmes en toute saison et dans la plupart des régions, à l'exception des événements estivaux dans les régions du sud, l'augmentation la plus forte (jusqu'à + 30%) étant simulée en automne et dans le nord de la chaîne (Rajczack <i>et al.</i> , 2013).	www.ensembles-eu.org
EURO-CORDEX (WRCP) Projections régionales multi-modèles à haute résolution spatiale (12,5 km) sur l'Europe et les Alpes, offrant une meilleure représentation des processus physiques de convection et de précipitations intenses, basées sur les simulations climatiques globales CMIP5 et sur les nouveaux scénarios d'évolution des concentration en GES établis pour le 5 ^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (<i>Representative Concentration Pathways, RCPs</i>) aux horizons 2021–2050 et 2071–2100 vs 1971–2000. Comparées aux résultats précédents du projet ENSEMBLES, les nouvelles simulations (Jacob <i>et al.</i> , 2014) indiquent : (i) Un réchauffement compris entre 1–4.5 °C (RCP4.5) et 2.5–5.5 °C (RCP8.5). (ii) Un déplacement vers le nord moins prononcé de l'évolution méditerranéenne vers un climat plus sec (avec dans les Alpes une diminution de la durée des longues vagues de chaleur, mais une augmentation du nombre total de vagues de chaleur). (iii) Une réduction de la fréquence des précipitations de faible intensité (< 10 mm/j), mais une augmentation des événements de forte intensité (> 30 mm/j).	www.euro-cordex.net
France	
Drias ^{les futurs du climat} Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21 ^{ème} siècle. Le portail DRIAS intègre notamment les simulations régionalisées issues du projet SCAMPEI (voir ci-dessous) et deux nouveaux ensembles de simulations issues des expériences IPSL2014 et CNRM2014, réalisés à partir des nouveaux scénarios RCP.	www.drias-climat.fr
Arc alpin	
ClimChAlp Simulations climatiques régionales sur l'arc alpin avec trois modèles climatiques régionaux (RegCM, REMO, HIRHAM et COSMO-CLM) utilisant différents scénarios SRES (A1B, A2, B1 et B2) du GIEC à différents horizons (2001-2100 et 2070-2100). Les résultats indiquent : (i) Une augmentation de la température moyenne mensuelle jusqu'à 5 K en août. Même avec le scénario B2, une augmentation de la température estivale jusqu'à 3,8 K et une augmentation jusqu'à 2 K en hiver sont calculées. Les températures d'été et d'automne devraient augmenter plus que celles d'hiver et de printemps. (ii) Une diminution des précipitations jusqu'à 30% en été, mais une augmentation en hiver d'environ 20% (40% dans certaines régions).	www.climchalp.org (non maintenu)
EEA, 2009 (Agence Européenne de l'Environnement) Simulations climatiques régionales sur l'arc alpin pour 2071-2100, basées sur le scénario SRES A1B du GIEC. Par rapport à la période de référence 1970-2000, ces simulations prévoient : (i) Une augmentation de la température moyenne annuelle de 3,9°C pour la fin du 21 ^e siècle, avec un réchauffement particulièrement marqué en haute montagne (> 1500 m), de 4,2°C, d'abord comparativement faible jusqu'à 2050 (1,4°C), puis s'accroissant nettement à partir de la seconde moitié du 21 ^e siècle. (ii) Une légère diminution des précipitations à la fin du siècle, comprise entre -1% et -11% selon les modèles et selon les régions, plus marquée au sud-ouest des Alpes, et avec des tendances très différentes selon les saisons. Les plus forts changements sont projetés en été, avec une diminution de -25% au NE des Alpes et jusqu'à -41% au SW à la fin du siècle, tandis que la plupart des régions connaîtraient une augmentation des précipitations au printemps et en hiver.	www.eea.europa.eu
AdaptAlp Simulations climatiques régionales multi-modèles sur l'arc alpin aux horizons futurs « proche » (2021-2050) et « distant » (2071-2100) par rapport à la période 1971-2000, basée sur le scénario SRES A1B du GIEC. Ces projections indiquent : (i) Une augmentation des températures moyennes annuelles de 1,5°C à 2,25°C dans le futur proche (plus forte en hiver qu'en été) et de 3,5°C à 4,75°C dans le futur distant (à l'inverse plus forte en été qu'en hiver). (ii) Une légère augmentation (+5%) des précipitations moyennes annuelles en hiver dans les parties nord de la région alpine et une légère diminution estivale (-5%) dans les parties méditerranéennes à l'horizon 2050, tandis qu'elles montrent à la fin du siècle une augmentation de +15% en hiver (+25% dans les Alpes centrales) et une diminution de -15% en été (-25% dans les parties méditerranéennes). (iii) Une augmentation de la disposition météorologique à la sécheresse en été.	www.adaptalp.org
CLISP Simulations climatiques régionales sur l'arc alpin selon les scénarios SRES A1B et B1 du GIEC pour deux périodes futures de 20 ans (2011-2030 et 2031-2050) par rapport à la période de référence 1961-1990. Elles prévoient un réchauffement des températures moyennes en toutes saisons après 2030, plus fort en été (entre 1,3°C et 3°C d'ici 2050). En continuité avec les tendances observées dans le passé, la partie centrale des Alpes se réchaufferait plus rapidement que les régions de piémont. Les températures maximales projetées présentent à peu près les mêmes tendances que les températures moyennes (indiquant une augmentation future de la fréquence des températures extrêmes), tout comme les températures minimales. Ces dernières présentent des tendances encore plus fortes en hiver, qui impliqueraient une réduction accrue du nombre de jours de gel et donc de la couverture neigeuse et des glaciers (qui sont particulièrement sensibles à l'augmentation des températures minimales). Concernant les précipitations, la tendance la plus claire est celle des précipitations estivales qui, selon une majorité de scénarios, présenteraient une légère diminution, jusqu'à -55 mm.	www.clisp.eu
ACQWA (FP7) Simulations climatiques régionales sur l'arc alpin. Les principales conclusions sont : (i) Un réchauffement d'ensemble pouvant aller jusqu'à +2°C en 2050, plus important au-dessus de 1500 m d'altitude en automne. (ii) Une augmentation des précipitations en hiver mais plutôt une diminution au printemps et en été, mais vraisemblablement une forte variabilité spatiale, avec des augmentations au nord des Alpes au printemps, en été et en automne, et des diminutions dans les parties sud et ouest. (iii) Une diminution de l'épaisseur de neige en hiver et au printemps. (iv) Une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes et des périodes humides plus séparées au sein des événements, avec des durées plus courtes mais une plus forte intensité. Vue d'ensemble des changements liés au cycle de l'eau et aux risques naturels dans l'arc alpin projetés pour le XXI ^e siècle dans Gobiet <i>et al.</i> (2013).	www.acqwa.ch
Note : Voir aussi les simulations climatiques régionales sur l'arc alpin des projets MANFRED et ALP FFIRS (cf. Tab. 2B).	www.manfredproject.eu www.alpffirs.eu
Alpes françaises	
SCAMPEI (ANR) Projections aux horizons proche (2021-2050) et lointain (2071-2100) basées sur les scénarios SRES (A1B, A2 et B1) du GIEC, associant des simulations à haute résolution (12 km) avec trois modèles climatiques régionaux et l'adaptation statistique d'analyses fines (8km) pour tenir compte au mieux de la complexité topographique. Pour les Alpes françaises, les résultats des simulations du projet SCAMPEI sont cohérents avec les projections régionales à l'échelle de l'Europe et de l'Arc alpin. En particulier une augmentation des extrêmes thermiques est attendue dans les Préalpes (Rome <i>et al.</i> , 2013).	www.cnr.meteo.fr/scampe

Tableau 10 : Exemples de projets et travaux proposant des projections climatiques et/ou d'impacts pour différentes zones d'étude intéressant les Alpes françaises (les intitulés et sites internet des projets figurent dans les Tabs. 2A, 2B et 2C).

2.2 Impacts futurs sur l'environnement alpin

L'absence de situation passée analogue au climat projeté rend d'autant plus difficile à prévoir les effets induits sur l'activité des aléas naturels (Schoeneich et de Jong, 2008). Nous résumons ici les résultats les plus étayés qui ont pu être obtenus jusqu'ici quant à la dynamique future des aléas hydro-gravitaires.

Poursuite du retrait glaciaire et de la dégradation du permafrost

Le forçage de modèles glaciologiques plus ou moins sophistiqués par les *scenarii* climatiques futurs suggère l'accélération du retrait glaciaire dans les Alpes au cours des prochaines décennies. Suivant le réchauffement (+2 à +5 °C en 2100) et l'échelle spatiale considérés, la réduction du volume et/ou de la superficie irait de 20-35% par rapport à 2000 jusqu'à une disparition quasi-totale des glaciers (Zemp *et al.*, 2006 ; Salzmann *et al.*, 2012).

Pour les Alpes Françaises, Le Meur *et al.* (2007) prévoient la disparition totale du glacier de Saint Sorlin (massif des Grandes Rousses) vers 2070, et Vincent *et al.* (2014) montrent que le retrait de la Mer de Glace (massif du Mont-Blanc) va se poursuivre même sous le climat actuel. Certains aléas glaciaires vont disparaître du fait du changement de configuration des glaciers, tandis que d'autres précédemment mentionnés vont apparaître. La dégradation du permafrost devrait se traduire par une augmentation de la fréquence voire du volume des écroulements rocheux, et par une accélération de l'écoulement des glaciers rocheux voire leur détachement (cf. Bodin *et al.*, ce volume).

Avalanches de neige

L'évolution prévue du manteau neigeux augmentera la proportion d'avalanches de neige humide par rapport aux avalanches de neige sèche, ce qui semble commencer à être détecté dans des séries d'observation (Pielmeier *et al.*, 2013). Les modifications induites (distance parcourue, pression d'impact) n'ont cependant pas d'implication univoque quant aux risques. Néanmoins l'évolution prévue de l'enneigement dans les Alpes françaises suggère une baisse globale de 20-30% de l'activité avalancheuse pour le XXI^e siècle, particulièrement marquée à basse altitude. Lors d'épisodes froids et très neigeux même très ponctuels, des avalanches éventuellement de grande ampleur pourront néanmoins toujours s'y produire. En haute altitude, il n'y aura vraisemblablement pas de diminution rapide de l'activité tant que le manteau neigeux restera substantiel ; les précipitations neigeuses extrêmes plus fortes prévues par certains modèles climatiques et la variabilité plus forte des températures hivernales déjà observable pourraient même y occasionner des avalanches de fonte plus fréquentes en « plein » hiver (Castebrunet *et al.*, 2014).

Crues et laves torrentielles

Les conditions climatiques favorables au déclenchement de glissements de terrain et de laves torrentielles devraient devenir plus fréquentes dans les Alpes pour la plupart des saisons excepté en juillet et août, même si la fréquence des pluies très intenses (> 30 mm/jour) pourrait augmenter dans certaines régions (projet ARNICA). Quel que soit le modèle climatique utilisé en entrée, une augmentation significative de la probabilité d'occurrence des laves torrentielles au nord comme au sud des Alpes est attendue pour 2050 et 2100 (Jomelli *et al.*, 2009), même si ces approches ne prennent pas en compte les transferts de sédiments dans les têtes de bassin.

Crues des rivières alpines

Les projections de l'évolution future des crues des rivières alpines en matière d'intensité, de fréquence et de saisonnalité doivent intégrer une multitude d'effets complexes et multiscalaires liés à l'élévation de la température, à la modification du régime des précipitations, ou encore à l'évolution de la couverture du sol. Des projets ont produit des simulations d'impacts utilisant plusieurs types d'indicateurs de disposition aux futures crues à différents pas de temps (Tab. 11), avec des résultats parfois contradictoires selon les espaces étudiés ou en fonction des modèles et *scénarii* climatiques utilisés, par exemple pour l'évolution des précipitations extrêmes en été.

Projet / référence*	Principaux résultats	Zone d'étude et horizons temporels
AdaptAlp	<ul style="list-style-type: none"> • Proche avenir : une relative stagnation du cumul maximal de précipitations sur 5 jours par saison pour la plupart des régions ou saisons, mais de possibles augmentations dans le nord des Alpes au printemps et à l'automne • Fin du siècle : une réduction des épisodes de fortes pluies durant l'été dans la plupart des régions (jusqu'à -30%). Pour l'hiver, des épisodes de fortes précipitations plus intenses (jusqu'à +20%) sont simulés dans tous les secteurs (Nilson <i>et al.</i>, 2012). 	Arc alpin Proche avenir : 2021-2050 Fin du siècle : 2071-2100
CLISP	Des projections sur l'ensemble de l'arc alpin basées sur un modèle conceptuel reliant la période de retour des crues à l'extension des zones contributives des bassins versants alpins indiquent que les débits de crue centennale augmenteraient plus dans les bassins de haute altitude, et plus dans les Alpes occidentales qu'orientales. Les bassins les plus fortement affectés se situeraient dans les Alpes suisses et italiennes, où un plus grand nombre de bassins versants tendent à passer d'un régime nival à un régime pluvial (EURAC, 2011 et références).	Arc alpin
Agence de l'eau RMC (2012)	<p>Les projections considérées comme robustes sur le grand Sud-Est français sont : une diminution des débits en été et en automne (-20 à -50%), un changement dans le régime des cours d'eau à influence nivale (pic de fonte avancé d'un à deux mois), des étiages plus sévères et plus longs, une baisse de l'équivalent en eau de la neige à 1200 m dès l'horizon 2030. Cette projection est plus robuste pour 2080, avec une très forte baisse au sud des Alpes (quasi disparition de la neige au printemps à 1200 m), une baisse des débits d'été et d'automne des affluents non méditerranéens du Rhône (-20 à -50% en 2050), ainsi qu'une forte baisse des débits estivaux de l'Isère et de la Durance (jusqu'à -75% en juin-juillet en 2050).</p> <p>Les projections considérées comme plus incertaines sont les suivantes : hausse des débits en hiver ; modules plutôt en baisse mais incertitudes en fonction des contrastes saisonniers ; stabilité voire hausse des débits d'hiver du Rhône ; baisse de l'équivalent en eau de la neige au nord-est des Alpes (avec de fortes incertitudes sur l'amplitude de cette baisse) ; incertitudes sur l'équivalent en eau de la neige en haute altitude (stabilité ou baisse dans le nord des Alpes, baisse significative au sud) ; stabilité ou hausse des débits hivernaux des affluents non méditerranéens du Rhône ; hausse des débits d'hiver de l'Isère et de la Durance ; incertitudes sur l'évolution des débits hivernaux des cours d'eau méditerranéens ; baisse incertaine de la recharge des nappes (qui pourrait être plus marquée dans les Alpes et en Corse).</p> <p>Les auteurs concluent que, de manière générale, malgré les projections de baisse généralisée des débits moyens au cours du 21e siècle, les valeurs de débits élevés ainsi que l'amplitude et la fréquence des crues ne devraient pas baisser et pourraient même s'aggraver, ce qui aura une incidence sur le dimensionnement des ouvrages, avec des contrastes plus forts à gérer.</p>	Bassins Rhône-Méditerranée et Corse (RMC)
EXPLORE 2070	On signalera également les résultats du projet EXPLORE 2070 concernant les débits de crue décennale, dont les conclusions indiquent une possible augmentation de l'intensité des crues dans les Cévennes, et au contraire une possible diminution des débits de crue décennale dans les zones de haut relief (Alpes, Pyrénées, Jura) à l'horizon 2046-2065. Les auteurs soulignent que les évolutions sur les crues restent fortement dépendantes de la méthode de descente d'échelle climatique choisie, et qu'il convient de rester prudent sur la significativité des évolutions simulées.	France

Tableau 11 : Exemples de projections de l'évolution future des crues alpines (projets : cf. tab. 2). Pour l'arc alpin, voir également les projections du projet ACQWA et celles publiées par l'EEA (2009). Pour le bassin de la Durance, voir les projets R²D² et RIWER2030.

3. Impacts socio-économiques

Les impacts avérés et potentiels des risques naturels sur la société peuvent être envisagés en croisant les évolutions observées et prévisibles des aléas avec les enjeux, principalement les personnes, les bâtiments, les infrastructures et les activités économiques.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'évolution concomitante des vulnérabilités matérielles, structurelles et fonctionnelles spécifiques aux territoires de montagne dans le contexte du changement global. Ce dernier est entendu comme l'ensemble des interactions résultant des combinaisons complexes entre changements d'origine climatique, mutations socio-économiques et évolutions politico-institutionnelles (Boudières *et al.*, 2013). Il convient par conséquent d'en considérer les aspects à la fois sociaux et économiques (coût des dommages, interruptions des activités, etc.), financiers (robustesse des systèmes d'assurance et de réassurance), règlementaires et juridiques (responsabilité des décideurs et des citoyens).

En vue d'une évaluation des risques potentiels, par exemple dans le cadre d'une démarche prospective comme celle des études de vulnérabilité territoriale réalisées dans les plans d'adaptation, il s'agit pour les gestionnaires de trouver des indicateurs pertinents permettant l'appréciation des évolutions du territoire en matière de « trajectoire de vulnérabilité » (Magnan *et al.*, 2012).

3.1 Impacts avérés

L'évolution des dommages au patrimoine bâti causés par les risques naturels en montagne reste peu documentée, bien que des données existent (assurances), et l'influence éventuelle des changements climatiques ne peut être discernée à l'aide des indicateurs existants (ex : arrêtés de catastrophe naturelle). En revanche, diverses sources mentionnent de possibles impacts sur des infrastructures linéaires.

Les pratiquants et professionnels de la montagne rapportent une augmentation de la dangerosité de certains itinéraires en haute altitude, liée au retrait rapide des glaciers et à la dégradation du permafrost, qui engendrent une modification progressive des pratiques des alpinistes pour s'adapter aux nouvelles conditions, notamment saisonnières (Weiss, 2011 ; Enquêtes orales « *Alpinisme et changement climatique* »⁶ ; Débat « *Coup de chaud sur l'alpinisme !* »⁷). Par ailleurs, le nombre et le coût global des interventions d'entretien sur les sentiers endommagés au sein d'espaces protégés comme le Parc des Ecrins augmentent (Claude Dautrey, communication personnelle).

Des interrogations apparaissent aujourd'hui quant aux phénomènes avérés de déstabilisation d'infrastructures touristiques (refuges, équipements de remontées mécaniques, etc.) en haute montagne en contexte de permafrost et de retrait glaciaire (Piccardi, 2014 ; Duvillard *et al.*, ce volume, et références)⁸.

Dans les espaces anthropisés de plus basse altitude, les impacts concernent les problèmes de mobilité et d'accessibilité dans les vallées alpines : risques de coupures des liaisons routières et ferroviaires. En particulier, les voies transfrontalières et transnationales représentent des infrastructures critiques, considérées comme stratégiques par les collectivités montagnardes et les

⁶ Vidéos disponibles sur <http://www.pierresquiroulent.fr/>

⁷ Projection-débat organisée par P. Bourdeau à Grenoble le 14 nov. 2014.

⁸ <http://www.fondazionemontagnasicura.org/fr/news/la-gestion-des-voies-dacces-aux-refuges-dhaute-montagne-suite-aux-changements-climatiques-rencontre-en-transfrontalier>

instances régionales, nationales et européennes (cf. projet PICRIT, Tab. 2B). L'accès aux stations de ski constitue également un fort enjeu économique. Dans plusieurs départements alpins, les services en charge des routes témoignent d'une augmentation apparente des interventions liées à l'incidence accrue des aléas hydro-gravitaires et de la nécessité pour eux, dans un contexte de restrictions budgétaires, de hiérarchiser les dangers et de prioriser les travaux de sécurisation. Notons que, dans tous ces exemples d'impacts sur le linéaire de routes et sentiers, l'évolution des besoins d'intervention peut aussi être liée à une augmentation du niveau d'exigence des usagers en termes de « permanence » du service.

Si les impacts physiques des avalanches sur les routes principales des Alpes du Sud augmentent également (Leone *et al.*, 2014), la part respective des facteurs climatique et anthropique n'est pas établie, non plus. Toutefois, les épisodes d'isolement provoqués par des crues avalancheuses semblent bel et bien s'y multiplier, comme par exemple dans les vallées de la Clarée ou du haut Guil en 2008, 2012 et 2015.

3.2 Autres impacts potentiels et/ou prévisibles pour le futur

Du fait de l'augmentation de la population et des infrastructures dans les vallées alpines, la répétition d'événements historiques extrêmes tels que les crues catastrophiques de juin 1957 ou la vidange de la poche d'eau du glacier de Tête Rousse en 1892 (Vincent *et al.*, 2012) auraient inévitablement des impacts destructeurs considérables, indépendamment du changement climatique. Toutefois, ces aléas ne seraient pas analogues, du fait de la modification des conditions d'écoulement par les ouvrages de protection, les aménagements hydrauliques et les modifications des versants induites par le réchauffement et ses conséquences (retrait glaciaire par exemple).

Compte tenu des projections existantes, certains ouvrages de protection pourtant coûteux pourraient s'avérer sous-dimensionnés vis-à-vis d'événements de forte magnitude éventuellement non envisagés ou sous-estimés. En outre, les forêts de protection pourraient souffrir d'une possible multiplication des perturbations liées aux événements extrêmes (projets IFP et MANFRED, Tab 2B).

L'approche par *scenarii* semble propice dans un contexte d'incertitude renforcée par les impacts du changement climatique, mais aussi pour ouvrir le champ des possibles en matière de réponses adaptatives ou alternatives pour les décideurs. Certains projets européens et nationaux sont ainsi consacrés à l'élaboration de *scenarii* de l'impact des changements globaux, climatiques, environnementaux ou sociétaux sur l'évolution future des aléas et des risques en Europe comme à l'échelle locale (Tab. 12).

Projet	Principaux résultats	Référence
CLISP (Alpine Space)	Une modélisation des impacts potentiels des chutes de blocs liées à la dégradation du permafrost a été menée à l'échelle de l'arc alpin dans son ensemble en termes de réduction de l'accessibilité des vallées. Cette analyse montre que de nombreuses routes pourraient être interrompues par les trajectoires des chutes de blocs potentielles. L'évaluation des conséquences sur le trafic routier en termes d'allongement du temps de trajet et de population affectée (dont le produit est utilisé comme un indicateur de la magnitude de ces impacts) indique que les conséquences économiques de ces impacts pourraient être importantes. Les coûts de protection et de restauration du réseau routier pourraient donc augmenter considérablement.	EURAC (2011)

SafeLand (FP7)	Dans le projet SafeLand, consacré aux mouvements de terrain, une méthodologie spécifique a été développée pour croiser des modèles de susceptibilité et de propagation intégrant des scénarios climatiques avec des données prospectives sur l'évolution des éléments à risques (routes, bâti et population) afin d'évaluer leur exposition en fonction du niveau d'aléa considéré. Les résultats exploratoires obtenus sur le bassin de Barcelonnette (Ubaye) projettent une diminution du nombre de kilomètres impactés le long du linéaire routier exposé aux aléas faibles à moyens, tandis que le nombre de kilomètres de routes impactés par des aléas forts à très forts aurait plutôt tendance à augmenter.	Baills <i>et al.</i> (2012)
----------------	---	-----------------------------

Tableau 12 : Exemples de travaux croisant des projections climatiques d'impacts sur les vulnérabilités liées à l'accessibilité routière.

Dans le contexte de l'après Fukushima, à la demande des pouvoirs publics, des approches par *scenarii* sont aussi utilisées dans les analyses de risques faites par des gestionnaires d'installations classées pour prendre en compte les couplages possibles entre aléas naturels et dangers d'origine anthropique, en vue d'anticiper les situations de crise et d'urgence que pourraient entraîner de tels « risques couplés » ou « en cascade » (Boudières *et al.*, 2012).

Conclusion et perspectives

Les résultats récents ici présentés viennent consolider le diagnostic sur la nature et l'ampleur des impacts du changement climatique dans les Alpes (Prudent-Richard *et al.*, 2008 ; Richard *et al.*, 2010). De nouveaux éléments de différenciation spatiale permettent d'esquisser une approche régionalisée des évolutions observées et des impacts avérés et projetés dans les Alpes françaises.

Les progrès accomplis sur ces thématiques reposent notamment sur une contribution notable de la recherche française en géosciences. L'analyse des risques potentiels, qui dépendront au moins autant de l'évolution des vulnérabilités que des changements dans les aléas, nécessite une contribution accrue des sciences humaines et sociales sur ces questions (géographie, économie, sociologie, sciences politiques, histoire et approches juridiques des risques), et surtout un couplage accru entre les différents champs disciplinaires. Malgré ces progrès, nombre d'incertitudes persistent dans la caractérisation des changements observés et la projection des changements futurs. La capacité des sociétés à les anticiper et s'y adapter est également incertaine, voire illusoire. Il est néanmoins nécessaire de continuer à financer des recherches appliquées et territorialisées mais également plus « fondamentales » pour réduire ces incertitudes. A ce titre, la nécessité absolue de maintenir les observatoires sur le long terme doit être réaffirmée. Parallèlement, il semble important de tendre vers une action préventive intégrant et restituant publiquement ces marges d'incertitudes, afin d'asseoir des modes de gestion plus transparents et davantage acceptés.

Dans la perspective d'une prise en compte intégrée et soutenable des risques naturels en montagne, cette synthèse ouvre également un questionnement sur les capacités de suivi et d'anticipation des changements dans les stratégies d'adaptation des territoires alpins. Ces questions conduisent à interroger à leur tour les réponses apportées par les acteurs publics et privés face aux défis posés par ces changements environnementaux et sociétaux.

Remerciements

Le PARN remercie les membres et partenaires de son réseau scientifique et technique qui ont contribué au travail réalisé en amont de cette revue, ainsi que la Région Rhône-Alpes pour son soutien au portail Alpes-Climat-Risques initié dans le projet ClimChAlp aux côtés de l'ONERC. La

DREAL Rhône-Alpes est également remerciée pour son soutien à la 'Base Projets' du PARN, ainsi qu'à la base de données transfrontalière des projets Interreg de coopération territoriale sur les risques naturels développée au sein du partenariat des projets Alcotra RiskNat et RiskNET. Merci enfin aux relecteurs anonymes, dont les suggestions ont contribué à l'amélioration du manuscrit.

Références

AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE ET CORSE (2012). – « Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse : bilan des connaissances ». Rapport pour le Plan d'adaptation au changement climatique Bassins Rhône-Méditerranée et Corse, 67 pp.

BALLS A., FONTAINE M., HOHMANN A., VANDROMME R., DESRAMAUT N. (2012). – "Methodology for predicting the changes in the landslide risk during the next 50 years at selected sites in Europe. Changing pattern of landslide risk in hotspot and evolution trends in Europe according to global change scenarios". SafeLand Deliverable D3.9, 188 pp.

BARD A., RENARD B., LANG M. (2012). – « Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc Alpin. *La Houille Blanche*, n° 1, pp 38-43.

BENISTON M., FOX D.G., ADHIKARY S., ANDRESSEN R., GUISAN A., HOLTEN J., INNES J., MAITIMA J., PRICE M., AND TESSIER L. (1996). – "The Impacts of Climate Change on Mountain Regions". In Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Chapter 5, Cambridge University Press, pp. 191-213.

BODIN X., DELINE P., SCHOENEICH P., RAVANEL L., MAGNIN F., KRYSIECKI J.M., ECHELARD T. (2015). – « Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : évolutions récentes dans les Alpes françaises ». *Journal of Alpine Research | Revue de Géographie Alpine*, ce volume.

BÖHM R., JONES P.D., HIEBL J., FRANK D., BRUNETTI M., MAUGERI M. (2010). – "The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760–2007". *Climatic Change*, Vol. 101, pp. 41-67.

BOUDIERES V., DELANNOY J.J., EINHORN B., GEORGE-MARCELOIL E., PEISSER C., PIAZZA-MOREL D. (2013). – « Synthèse du Workshop "Changement global et risques naturels" », PARN et Labex ITEM, 21 & 22 mars 2013, 30 pp.

BOUDIERES V., EINHORN B., PEISSER C., VENGEON J.M., 2012. – « *Risques couplés : La prise en compte des couplages entre phénomènes naturels alpins et activités anthropiques – Etudes de cas* ». Rapport PARN avec le soutien de la Région Rhône-Alpes, 59 pp.

CASTEBRUNET H., ECKERT N., GIRAUD G., DURAND Y., MORIN S. (2014). – "Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods". *The Cryosphere*, Vol. 8, pp 1673–1697.

CORONA C., GUIOT J., EDOUARD J.L., CHALIÉ F., BÜNTGEN U., NOLA P., URBINATI C. (2010). – "Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings". *Climate of the Past*, Vol. 6, pp. 379-400.

Cossart É. (2013). – "Influence of local vs. regional settings on glaciation pattern in the French Alps". *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Vol. 36, pp. 39-52.

DUMAS, D. (2013). – "Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century". *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 111, pp 223-233.

DURAND Y., GIRAUD G., LATERNSEER M., ETCHEVERS P., MÉRINDOL L., LESAFFRE B. (2009a). – "Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958–2002): Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 48, pp. 429-449.

DURAND, Y., GIRAUD, G., LATERNSEER, M., ETCHEVERS, P., MÉRINDOL L., LESAFFRE B. (2009b). – "Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 48, pp. 2487-2512.

DUVILLARD PA., RAVANEL L., DELINE P. (2015). – « Evaluation du risque de déstabilisation des infrastructures engendré par le réchauffement climatique dans la haute montagne alpine française ». *Journal of Alpine Research | Revue de Géographie Alpine*, ce volume.

- ECKERT N., BAYA H., DESCHÂTRES M. (2010b). – “Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in France”. *Journal of Climate*, 23, pp 3157-3180.
- ECKERT N., PARENT E., KIES R., BAYA H. (2010a). – “A spatio-temporal modelling framework for assessing the fluctuations of avalanche occurrence resulting from climate change: application to 60 years of data in the northern French Alps”. *Climatic Change*, Vol. 101, N° 3-4, pp. 515-553.
- ECKERT N., KEYLOCK C.J., CASTEBRUNET H., LAVIGNE A., NAAIM M. (2013). – “Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions: from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods”. *Journal of Glaciology*, Vol. 59, No. 213, pp. 93-114.
- EINHORN B. et PEISSER C. (2011). – « Actes du séminaire international d'experts “Adaptation de la gestion des risques naturels face au changement climatique” – Transcription intégrale des présentations et discussions, validée par leurs auteurs », Projet ESPACE ALPIN AdaptAlp: “Adaptation to Climate Change in the Alpine Space”, 26 janvier 2011, Domancy, 76 pp.
- EURAC (INSTITUTE FOR APPLIED REMOTE SENSING) (2011). – “CLISP - Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space – WP 4 – Vulnerability Assessment”. ALPINE SPACE project CLISP Synthesis Report, 144 pp.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) (2009). – “Regional climate change and adaptation - The Alps facing the challenge of changing water resources”. EEA Report 8/2009, (Isoard, S. coord.), Copenhagen, 2009, ISBN 978-92-9213-006-0, 148 pp. DOI 10.2800/12552
- GARDENT, M. (2014). – “*Le retrait glaciaire dans les Alpes occidentales depuis la fin du PAG et ses aléas induits*”. Thèse de doctorat de Géographie, Université de Savoie, 250 p.
- GARDENT M., RABATEL A., DEDIEU JP, DELINE P. (2014). – “Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s”. *Global and Planetary Change*, Vol. 120, pp. 24-37.
- GARITTE G., LAHOUSSE P., THENARD L., SALVADOR PG. (2007) – « Evolution contemporaine de l'activité torrentielle sur les cônes de déjection de la basse vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes du Sud) ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 4, pp. 294-308.
- GIBELIN A.L., DUBUISSON B., CORRE L., DEAUX N., JOURDAIN S., LAVAL L., PIQUEMAL J.M., MESTRE O., DENNETIERE D., DESMIDT S., TAMBURINI A. (2014). – « Évolution de la température en France depuis les années 1950. Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence ». *La Météorologie*, N° 87, pp. 45-53.
- GILBERT A., VINCENT C., WAGNON P., THIBERT E., RABATEL A. (2012). – “The influence of snow cover thickness on the thermal regime of Tête Rousse Glacier (Mont Blanc range, 3200 m a.s.l.): Consequences for outburst flood hazards and glacier response to climate change”. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 117, F04018.
- GILBERT A. AND C. VINCENT. (2013). – “Atmospheric temperature changes over the 20th century at very high elevations in the European Alps from englacial temperatures”. *Geophysical Research Letters*, 40(10), pp. 2102-2108.
- GOBIET A., KOTLARSKI S., BENISTON M., HEINRICH G., RAJCZAK J., STOFFEL M. (2013). – “21st century climate change in the European Alps: A Review”. *Science of the Total Environment*, Vol. 493, pp. 1138-1151.
- IPCC (2012). – “*Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*”. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD C.B., BARROS V., STOCKER T.F., QIN D., DOKKEN D.J., EBI K.L., MASTRANDREA M.D., MACH K.J., PLATTNER G.-K., ALLEN S.K., TIGNOR M., MIDGLEY P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- ISOTTA FA., FREI C., WEILGUNI V., PERČEC TADIĆ M, LASSÈGUES P., RUDOLF B., PAVAN V., CACCIAMANI C., ANTOLINI G., RATTO S.M, MUNARI M., MICHELETTI S., BONATI V., LUSSANA C., RONCHI C., PANETTIERI E., MARIGO G., VERTAČNIK G. (2014). – “The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data”. *International Journal of Climatology*, Vol. 34, pp. 1657-1675.
- JACOB D., PETERSEN J., EGGERT B., ALIAS A., CHRISTENSEN O., B.; BOUWER L., BRAUN A., COLETTE A., DÉQUÉ M., GEORGIEVSKI G., GEORGOPOULOU E., GOBIET A., MENUET L., NIKULIN G., HAENSLER A., HEMPELMANN N., JONES C., KEULER K., KOVATS S., KRÖNER N., KOTLARSKI S., KRIEGSMANN A., MARTIN E., MEIJGAARD E., MOSELEY C., PFEIFER S., PREUSCHMANN S., RADERMACHER C., RADTKE K., RECHID D., ROUNSEVELL M., SAMUELSSON P., SOMOT S., SOUSSANA J.-F., TEICHMANN C., VALENTINI R., VAUTARD R., WEBER B., YIOU, P. (2014). – “EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research”. *Regional Environmental Change*, Vol. 14, pp 563-578.

- JOMELLI V., BRUNSTEIN D., DÉQUÉ M., VRAC M., GRANCHER D. (2009). – “Impacts of future climatic change (2070–2099) on the potential occurrence of debris flows: a case study in the Massif des Ecrins (French Alps)”. *Climatic Change*, Vol. 97, N° 1-2, pp. 171-191.
- JOMELLI V., PAVLOVA I., ECKERT N., GRANCHER D., BRUNSTEIN D. (IN PRESS) – “A new hierarchical Bayesian approach to analyse environmental and climatic influences on debris flow occurrence”. *Geomorphology*.
- LAVIGNE A., ECKERT N., BEL L., PARENT E. (2015). – “Adding expert contribution to the spatio-temporal modeling of avalanche activity under different climatic influences”. *Journal of the Royal Statistical Society C (Applied Statistics)*, (early view online).
- LE MEUR E., GERBAUX M., SCHAFER M., VINCENT C. (2007). – “Disappearance of an Alpine glacier over the 21st Century simulated from modeling its future surface mass balance”. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4), pp. 367-374.
- LEONE F., COLAS A., GARCIN Y., ECKERT N., JOMELLI V. ET GHERARDI M. (2014). – « Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français », *Journal of Alpine Research | Revue de Géographie Alpine* [En ligne], | 2014, mis en ligne le 30 septembre 2014, consulté le 02 novembre 2014.
- LOPEZ SAEZ J., CORONA C., STOFFEL M., BERGER F. (2013). – “Climate change increases frequency of shallow spring landslides in the French Alps”. *Geology*, Vol. 41, pp. 619-622.
- LOPEZ SAEZ J., CORONA C., STOFFEL M., GOTTELAND A., BERGER F., LIÉBAULT F. (2011). – “Debris-flow activity in abandoned channels of the Manival torrent reconstructed with LiDAR and tree-ring data”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 1247-1257.
- MAGNAN A., DUVAT V., GARNIER E. (2012). – « Reconstituer les « trajectoires de vulnérabilité » pour penser différemment l'adaptation au changement climatique », *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 20, pp. 82-91.
- MALET J.-P., DURAND Y., REMAÎTRE A., MAQUAIRE O., ETCHEVERS P., GUYOMARC'H G., DÉQUÉ M., VAN BEEK L.P.H. (2007). – “Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley”. In: McInnes, R. & Fairbank, H. (Eds): *Proceedings International Conference on Landslides and Climate change – Challenges and Solutions*, Wiley, London.
- NILSON E., KRAHE P., GÖRGEN K. (2012). – “Climate Projections for the Greater Alpine Region: An evaluation of selected regional climate simulations with respect to hydrometeorological variations”. Technical report BFG-1749, Koblenz, 84 pp.
- PICCARDI M. (2014). – « Accès à la Haute Montagne et Changements Climatiques, action 2.3 ». In Séance technique transfrontalière du Groupe Technique et Scientifique (GTS) : « La gestion des voies d'accès aux refuges d'haute montagne suite aux changements climatiques », Fondation Montagne sûre, Courmayeur (AO), 09 septembre 2014.
- PIELMEIER C., TEHEL F., MARTY C., STUCKI T. (2013). – “Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps - trend analysis for mid-winter season”. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble and Chamonix*, pp. 1240-1246.
- PRUDENT-RICHARD G., GILLET M., VENGEON JM., DESCOTES-GENON S., EINHORN B., BOURJOT L., DENISET T., BOURCIER B., RICHARD D., VINCENT C., ETCHEVERS P., GRUBER S., HAEBERLI W., ROER I., ZEMPF M., LOGLISCI N., PELOSINI R., LANG M., OBLIED C., REQUILLART P., DUBAND D., JONGMANS D., SCHAEGLER B., ECKERT N., FORCHERON P., BENISTON M., PRICE M., GILLET F. (2008). – « Changement climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels ». Rapport Technique N°1, ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PGRN), Région Rhône-Alpes, 100 pp.
- RABATEL A., LETRÉGUILLY A., DEDIEU JP., ECKERT N. (2013). – “Changes in glacier equilibrium-line altitude in the western Alps from 1984 to 2010: evaluation by remote sensing and modeling of the morpho-topographic and climate controls”. *The Cryosphere*, Vol. 7, pp 1455-1471.
- RAJCAK J., PALL P., SCHÄR C. (2013). – “Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 118, pp. 3610-3626.
- RAVANEL L. (2009). – « Evolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel du réchauffement climatique ». Collection EDYTEM, *Cahiers de Géographie*, N° 8, pp. 113-124.
- RAVANEL L., DELINE P. (2011). – “Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the ‘Little Ice Age’”. *The Holocene*, Vol. 21, n°2, pp. 357-365.
- RICHARD D., GEORGE-MARCELOIL E., BOUDIERES V., 2010. – « Changement climatique et développement des territoires de montagne : quelles connaissances pour quelles pistes d'action ? », in *Revue de Géographie Alpine | Journal of Alpine Research* [En ligne], 98-4.

- ROME S., LI S. ET BIGOT S. (2013). – « Les extrêmes thermiques dans les Préalpes françaises : évolutions présentes (1961-90) et futures (de 2021 à 2100) ». Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 26, pp. 446-451.
- ROUSSELOT M., DURAND Y., GIRAUD G., MERINDOL L., DOMBROWSKI-ETCHEVERS I., DEQUE M., CASTEBRUNET H. (2012). – “Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French Alps – application to future climate and snow cover”. *The Cryosphere*, 6 pp. 785-805.
- SALZMANN N., MACHGUTH H., LINSBAUER A. (2012). – “The Swiss Alpine glaciers’ response to the global “2 °C air temperature target”. *Environmental Research Letters*, Vol. 7, 044001.
- SCHOENEICH P., DE JONG C. (2008) – « Évolution de l’environnement alpin ». *Journal of Alpine Research | Revue de Géographie Alpine*, Vol. 96-4, pp 53-64.
- THIBERT E., ECKERT N., VINCENT C. (2013). – “Climatic drivers of seasonal glacier mass balances: an analysis of 6 decades at Glacier de Sarennes (French Alps)”. *The Cryosphere*, Vol. 7(1). pp 47-66.
- VALLET A., CHARLIER JB., CHANUT MA., BERTRAND C., DUBOIS L., MUDRY J. (2013). – “Seasonal and long term analysis of precipitation-displacement relationships on a deep seated unstable slope (Séchilienne, French Alps)”. JAG – 3èmes journées Aléas Gravitaires, Sep 2013, Grenoble, France. pp. 1-6.
- VAN DEN BESSELAAR EJM., KLEIN TANK AMG, BUISHAND TA. (2013). – “Trends in European precipitation extremes over 1951–2010”. *International Journal of Climatology*, Vol. 33-12, pp. 2682-2689.
- VINCENT C. (2002). – “Influence of climate change over the 20th century on four French glacier mass balances”. *Journal of Geophysical Research*, 109(D19), 4375.
- VINCENT C., DESCLOITRES M., GARAMBOIS S., LEGCHENKO A., GUYARD H., GILBERT. A. (2012). – “Detection of a subglacial lake in Glacier de Tete Rousse (Mont Blanc area, France)”. *Journal of Glaciology*, Vol. 58(211), pp. 866-878.
- VINCENT C., AUCLAIR S., LE MEUR. E. (2010). – “Outburst flood hazard for glacier-dammed Lac de Rochemelon, France”. *Journal of Glaciology*, Vol. 56(195), pp. 91-100.
- VINCENT C., HARTER M., GILBERT A., BERTHIER E., SIX. D. (2014). – “Future fluctuations of Mer de Glace, French Alps, assessed using a parameterized model calibrated with past thickness changes”. *Annals of Glaciology*, Vol. 55(66), pp. 15-24.
- WEISS J. (2011). – « Le réchauffement climatique implique-t-il une évolution des pratiques alpines ? ». In Assises de l’Alpinisme, pp 49-52.
- WILHELM B., ARNAUD F., GIGUET-COVEX C., DELANNOY J.J. (2012) – « Changements climatiques et crues torrentielles : quelles relations ? ». In Actes du 25ème Colloque de l’Association Internationale de Climatologie, Grenoble, sept. 2012, pp. 769-774.
- ZEMP M., HAEBERLI W., HOELZLE M., PAUL F. (2006). – “Alpine glaciers to disappear within decades?”. *Geophysical Research Letters*, 33, L13504.
- ZERATHE S., LEBOURG T., BRAUCHER R., BOURLÈS D. (2013). – “Mid-Holocene cluster of large-scale landslides revealed in the Southwestern Alps by ³⁶Cl dating. Insight on an Alpine-scale landslide activity”. *Quaternary Science Review*, Vol. 90, 106-127.