

# **EVALUER L'EVOLUTION DES CRUES TORRENTIELLES A PARTIR DE SEQUENCES SEDIMENTAIRES LACUSTRES DANS LES ALPES FRANÇAISES**

## **APPLICATIONS ET IMPLICATIONS POUR LE RECHAUFFEMENT GLOBAL**

# **ASSESSING THE EVOLUTION OF TORRENTIAL FLOOD ACTIVITY FROM LAKE SEDIMENT RECORDS IN FRENCH ALPS**

## **APPLICATIONS AND IMPLICATIONS TO THE CURRENT GLOBAL WARMING**

**B. Wilhelm**<sup>1</sup>, F. Arnaud<sup>2</sup>, C. Giguet-Covex<sup>3</sup>, J.J. Delannoy<sup>4</sup>, P. Sabatier<sup>5</sup>

### **RESUME**

La montée brutale des eaux, les forts débits et la quantité de matériaux charriés font des crues torrentielles des événements dangereux et dommageables pour les populations de montagne. Aujourd'hui une augmentation de l'intensité des extrêmes hydrologiques est attendue avec le réchauffement global. Cependant le manque d'observations des phénomènes torrentiels et de mesures directes des précipitations en altitude ne permet pas d'étayer cette théorie. Nous proposons ici d'étudier des séquences sédimentaires de lacs d'altitude pour reconstituer l'évolution de la fréquence et de l'intensité des crues passées. La comparaison des calendriers de crues ainsi obtenus avec des reconstitutions de température suggère des modèles régionaux d'évolution de l'activité torrentielle. Sur l'ensemble des Alpes Françaises la fréquence de crue à l'échelle centennale à millénaire augmente en période froide. Cependant l'intensité des crues augmente en période chaude dans les Alpes du Nord alors qu'elle diminue dans les Alpes du Sud.

**Mots-clés:** crues torrentielles, changement climatiques, sédiments lacustres, Alpes françaises, millénaire

### **ABSTRACT**

Owing to the sudden rise of water, high discharges and the amount of debris, torrential floods are dangerous and damaging events to mountain people. Today an increasing intensity of hydrological extremes is theoretically expected with the global warming. However the lack of observations of phenomena and monitoring of rainfall from high-elevation sites does not allow to backup this theory. We propose to study sedimentary sequences of high-elevation lakes to reconstruct the past evolution of flood frequency and intensity. The comparison of the obtained flood calendars with temperature reconstructions suggests regional flood patterns. Flood frequency over a centennial-to-millennial timescale increases during cold periods over the French Alps. However, the flood intensity increases during warmer periods in the Northern Alps while it decreases in the Southern Alps.

**Keywords:** torrential floods, climate changes, lake sediments, French Alps, millennium

---

<sup>1</sup> Bruno Wilhelm, EDYTEM, CNRS-Univ. de Savoie, France, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France (e-mail : bruno.wilhelm@univ-savoie.fr)

<sup>2</sup> Fabien Arnaud, EDYTEM, CNRS-Univ. de Savoie, France, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France

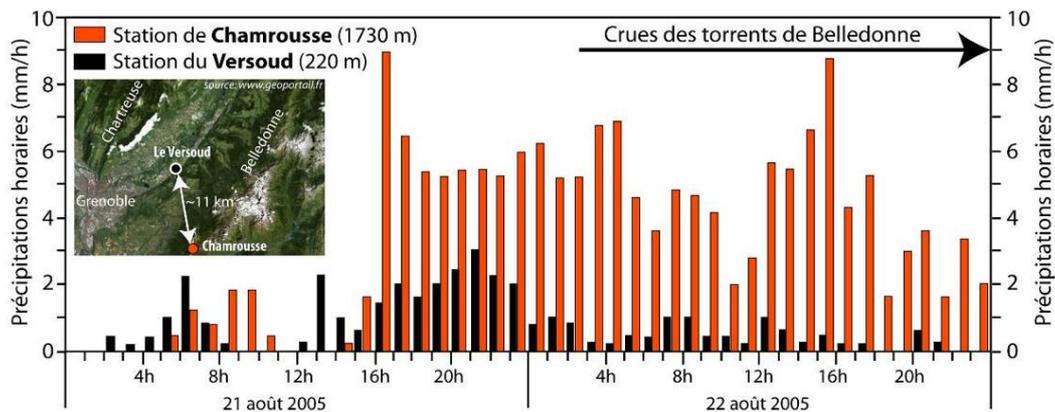
<sup>3</sup> Charline Giguet-Covex, EDYTEM, CNRS-Univ. de Savoie, France, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France

<sup>4</sup> Jean-Jacques Delannoy, EDYTEM, CNRS-Univ. de Savoie, France, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France

<sup>5</sup> Pierre Sabatier, EDYTEM, CNRS-Univ. de Savoie, France, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac, France

## POURQUOI ET COMMENT EVALUER L'EVOLUTION PASSEE DE L'ACTIVITE TORRENTIELLE

Les crues torrentielles résultent de précipitations intenses et de courtes durées qui se concentrent très rapidement dans les bassins versants de montagne, de petite taille et à forte pente (Merz and Bloeschl, 2003). La montée brutale des eaux, les forts débits et l'importante quantité de matériaux charriés rendent ces événements particulièrement dangereux et dommageables pour les populations de montagne (OCDE, 2007). A titre d'exemple le violent orage (93 mm en moins de 3 heures) du 14 juillet 1987 a été à l'origine de la crue catastrophique du Grand-Bornand (massif des Aravis), détruisant un camping et provoquant le décès de 23 personnes (Meunier, 1990). Plus récemment les 21 et 22 août 2005, près de 300 mm de pluie sont tombés en 48h provoquant la crue de nombreux torrents dans le massif de Belledonne et causant de très nombreux dégâts ; routes emportées, inondation et engravement d'habitations, destructions d'infrastructures hydroélectriques, etc. (Allignol et al., 2008 ; Fig. 1). Les Alpes du Sud connaissent également des événements de ce type touchant généralement des régions plus vastes, comme les départements du Var en juin 2010 ou des Alpes Maritimes en novembre 1994 par exemple (Buzzi et al., 1998 ; Moreau et Roumagnac, 2010). Aujourd'hui, l'évolution de l'aléa torrentiel devient une question préoccupante (ONERC, 2008) dans un contexte d'augmentation attendue des événements extrêmes avec le réchauffement global (Milly et al., 2002 ; IPCC, 2007) et de densification du bâti dans les zones à risque, rendant les populations de montagne plus vulnérables (Beniston et Stephenson, 2004 ; OcCC, 2007). Cependant les rapports traitant de l'évolution des risques naturels dans les Alpes n'évoquent pas de tendance significative quant à l'évolution des crues torrentielles (OcCC, 2007), essentiellement par manque de données disponibles et la difficulté d'en acquérir (ONERC, 2008). En effet les précipitations à l'origine des crues torrentielles sont le plus souvent associées à des événements convectifs localisés, et nettement plus importantes en altitude où peu de stations météorologiques sont implantées (Kieffer-Weisse et Bois, 2001). Par exemple, lors des crues d'août 2005 dans le massif de Belledonne, 300 et 160 mm de pluie ont été enregistrés en 48 heures à 2100 et 1730 m d'altitude, respectivement (refuge de La Pra et Chamrousse), pour seulement 32 mm à 220 m d'altitude (Versoud) (Allignol et al., 2008, Fig. 1). De plus il n'existe pas de suivi continu de systèmes torrentiels, à l'exception de quelques bassins expérimentaux (ONERC, 2008).



**Fig. 1** Hourly rainfall amounts of the 21st and 22nd August 2005, inducing torrential floods over the mountain range of Belledonne. Records from the weather stations of the Versoud (220 m a.s.l.) and Chamrousse (1730 m a.s.l.) (modified from Allignol et al., 2008)

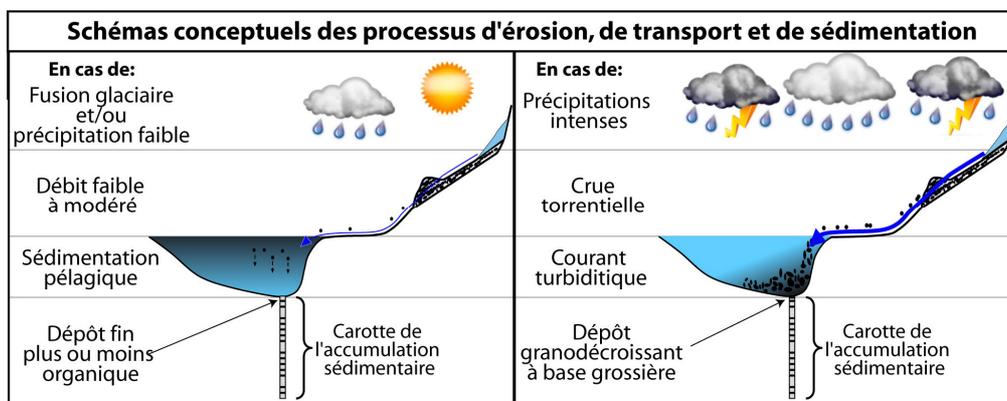
**Fig. 1** Précipitations horaires des 21 et 22 août 2005 à l'origine de crues torrentielles dans le massif de Belledonne. Enregistrements issus des stations météorologiques du Versoud (220 m) et de Chamrousse (1730 m) (modifié d'après Allignol et al., 2008)

Pour palier ce manque, des travaux ont été menés pour reconstituer les précipitations en altitude à partir de méthodes d'interpolation (par exemple Kieffer-Weisse, 1998 et Djerboua, 2001). Si ces études ont permis de déterminer la saisonnalité des précipitations intenses et d'estimer des temps de retour dans les Alpes françaises, leur évolution sur le temps long n'a pu être traitée. Par ailleurs, la forte variabilité spatiale des précipitations et la topographie complexe du milieu alpin ne permettent

pas à l'heure actuelle d'obtenir de résultats robustes quant à l'évolution des précipitations extrêmes par modélisation (Beniston, 2006 ; Frei et al., 2006). Dans ce contexte, le recours aux archives historiques et/ou naturelles semble nécessaire pour estimer et mieux comprendre l'évolution de l'aléa torrentiel dans le temps. Le dépouillement de documents historiques permet d'obtenir des dates précises d'événements ainsi qu'une description souvent détaillée des dommages et parfois même un contexte météorologique (Blanchemanche, 2009). Dans certains cas les événements peuvent être classés en fonction des dommages, ce qui permet d'évaluer l'évolution de l'intensité relative des crues sur un même site (Cœur, 2003 ; Blanchemanche 2009). Cependant la vulnérabilité et la perception du risque par l'homme peut évoluer au cours du temps, modifiant ses pratiques et pouvant ainsi biaiser les écrits (Brazdil et al., 2005). A titre d'exemple, l'occupation des berges du Vorz à Sainte-Agnès (Belledonne) a largement évolué entre les années 1850, où quasiment aucune infrastructure n'était présente, et aujourd'hui où de nombreuses habitations ont été construites (Allignol et al., 2008). Cette modification du bâti a pu entraîner une modification de la vulnérabilité et ainsi augmenter virtuellement les intensités de crues reportées dans les archives. Enfin les archives peuvent également être incomplètes ou discontinues, suite à des incendies, pertes, etc. Les archives historiques apportent ainsi un enseignement très riche mais nécessite une interprétation prudente (Barrera et al., 2006). C'est pourquoi certains auteurs comme Brazdil et al. (2005) suggèrent de coupler archives historiques et archives naturelles pour l'étude des crues. Parmi les archives naturelles, les sédiments de lac présentent les avantages « d'enregistrer » les crues, d'être bien représentés en milieu de (haute-) montagne où les précipitations sont les plus importantes et d'être des archives continues pouvant couvrir de longues périodes de temps. Nous proposons ainsi d'étudier les sédiments de lacs d'altitude, conjointement aux archives historiques, pour évaluer le rôle de la température sur l'aléa torrentiel dans les Alpes Françaises.

## LES SEDIMENTS LACUSTRES COMME ARCHIVE DES CRUES DU PASSE

Les lacs agissent comme des pièges à sédiment en retenant les matériaux charriés par le torrent (Fig. 2). Au cours d'un événement de précipitations intenses, l'augmentation importante et brutale du débit d'un torrent entraîne une augmentation de sa capacité d'érosion et de transport. Des particules plus nombreuses et de taille plus importante sont alors charriées, augmentant la densité des eaux du torrent qui plongent à leur entrée dans le lac. Le plongement de ces eaux très chargées (appelé « courant de turbidité hyperpycnal ») est à l'origine de dépôts granodécroissants à base plus ou moins grossière, en fonction de l'intensité maximum du courant (Sturm et Matter, 1978 ; Fig. 4). Il est à noter que des dépôts similaires peuvent également être générés par des glissements en masse des sédiments accumulés sur les pentes. Seule une étude approfondie de la spatialisation et de la granulométrie des dépôts permet de distinguer les dépôts issus d'une crue ou d'un remaniement gravitaire (par exemple Arnaud et al., 2002 ; Wilhelm et al., sous presse).



**Fig. 2** Conceptual patterns of main processes of erosion, transport and sedimentation in a high-elevation catchment area, in case of a low-to-moderate discharge and of a torrential flood event

**Fig. 2** Schémas conceptuels des principaux processus d'érosion, de transport et de sédimentation dans un petit bassin versant d'altitude, dans les cas d'un débit faible à modéré et de crue torrentielle

La reconnaissance dans la séquence sédimentaire et la datation des dépôts de crue permettent alors la reconstitution de chroniques de crues torrentielles (Giguet-Covex et al., 2012 ; Wihelm et al., sous presse). Dans certains cas il est également possible de reconstituer l'intensité des crues à partir d'analyses granulométriques (Giguet-Covex et al., 2012), ou de l'épaisseur des dépôts (Wihelm et al., sous presse). L'étude des sédiments lacustres semble ainsi être une approche particulièrement pertinente pour traiter de l'évolution des crues torrentielles en milieu alpin sur le temps long. Dans cette démarche, trois sites ont été investigués dans les Alpes françaises : le Lac d'Anterne (ANT), le Lac Blanc (BLB) et le lac d'Allos (ALO).

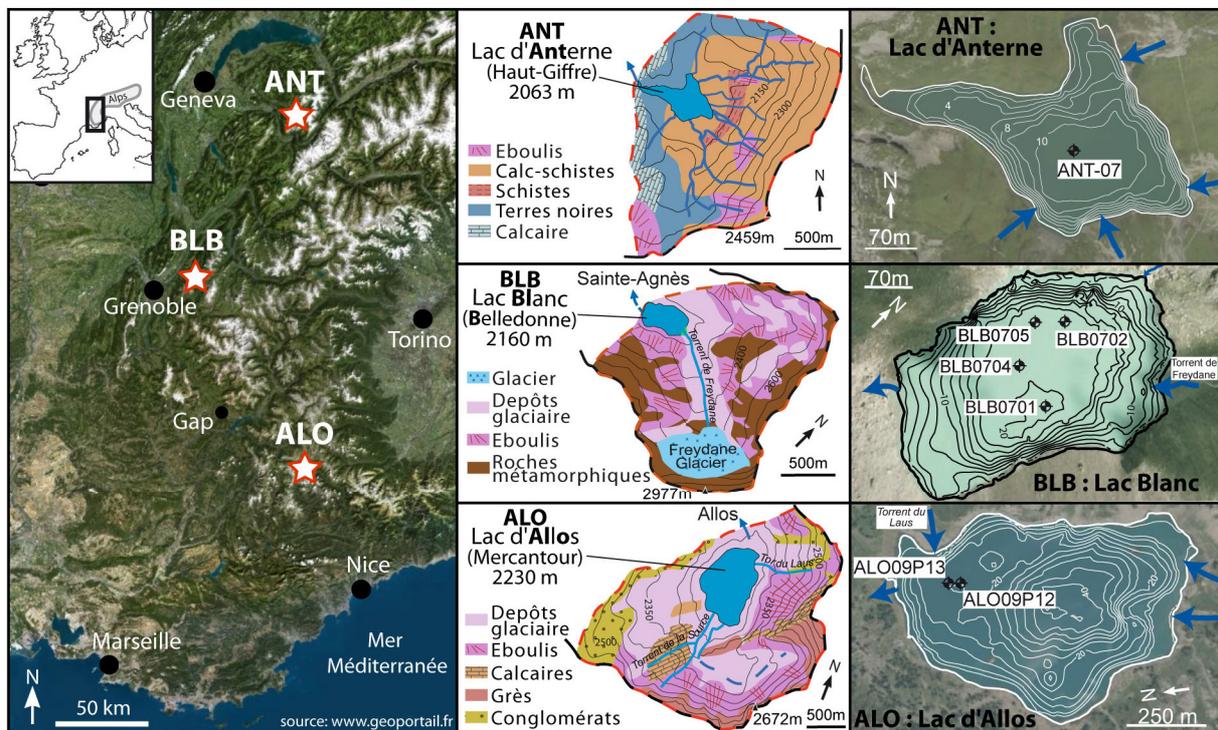
## **LE LAC BLANC**

Suite à la crue d'août 2005 dans le massif de Belledonne, l'enregistrement sédimentaire du lac Blanc (BLB, 45°10'42''N, 5°58'20''E, 2160 m) a été investigué. Situé en amont du village de Sainte-Agnès qui a été affecté par cette crue et en aval d'une marge proglaciaire garantissant un stock de matériel important et facilement érodable, l'étude de ce lac visait à renseigner sur le temps de retour de cet événement catastrophique. Au cours de la mission de carottage en juillet 2007 un relevé bathymétrique (carte de profondeur d'eau) a été réalisé. Superposé à la photo aérienne de 2003, il a permis de mettre en évidence une progradation de l'ensemble du delta de l'ordre de 15 mètres, ce qui représente 13.5 % de l'ensemble du corps deltaïque (Wilhelm et al., sous presse). Un tel apport de matériau en un temps aussi court suggère que la crue de 2005 fut particulièrement violente. Quant aux sédiments du Lac Blanc, ils sont constitués de dépôts granodécroissants intercalés dans une boue silto-argileuse (Fig. 4A). Parmi les dépôts granodécroissants, 4 ont été identifiés comme résultant de remaniements gravitaires et 31 comme résultant de crues à partir d'analyses granulométrique et de la spatialisation des dépôts (approche multi-carottes) (Wilhelm et al., sous presse). Des analyses géochimiques par scanner de carottes ont révélé des enrichissements en calcium dans la fraction grossière et en fer dans la fraction fine. Le rapport calcium sur fer représente alors un traceur indirect et à haute-résolution de la granulométrie. La confrontation de ce rapport avec des observations sur lames minces supporte cette observation et a de plus permis de détecter des fins dépôts de crue non visibles à l'œil ou par granulométrie laser (Fig. 4A). Au total 57 dépôts de crue ont ainsi pu être détectés, soit 26 de plus qu'initialement. Quant à la reconstitution de l'intensité des événements de précipitations, l'hypothèse est faite pour ce site que le stock de matériel morainique disponible est suffisamment important pour que la quantité de matériel érodée et transportée soit proportionnelle à l'intensité de l'événement de crue. L'intensité des événements passés est alors estimée à partir de la masse accumulée par unité de surface et par événement (Fig. 5). Enfin la datation de cette séquence a été réalisée à partir de la mesure des radioéléments (<sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am) issus de l'accident de Chernobyl (1986) et des essais nucléaires atmosphériques (1954-1963), de la mesure du plomb traçant l'usage d'essence avec additif au plomb (maximum en 1974) et de la corrélation de remaniements gravitaires avec des séismes régionaux (1963, 1962, 1881 et 1782). Enfin la comparaison des principaux dépôts de crue avec les crues historiques ayant affecté Sainte-Agnès entre 1831 et aujourd'hui ont permis d'affiner le modèle d'âge et de supporter la reconstitution de l'intensité à partir de l'accumulation massique (Wilhelm et al., sous presse). En effet au cours des 150 dernières années, il apparaît une très bonne concordance entre les événements reportés dans les archives historiques et les événements interprétés comme les plus intenses. Cependant pour l'événement associé à 1784, l'interprétation de l'accumulation massique comme image de l'intensité de la crue est incertaine. En effet celui-ci se produit juste après le remaniement gravitaire de 1782 qui semble provenir des pentes du delta. Il est ainsi probable que ce glissement en masse ait pu modifier le fonctionnement du delta, soit en piégeant des particules dans la niche de glissement, soit au contraire en facilitant la remobilisation de matériel métastable. Enfin la datation des 57 événements de crue au cours des 270 dernières années indique un temps de retour moyen de l'ordre de 5 ans.

## **LE LAC D'ANTERNE**

Le Lac d'Anterne (ANT, 45°59'27''N, 6°47'54''E, 2063m ; Fig.3) situé dans le massif du Haut-Giffre est entouré de substrats géologiques facilement érodables (terres noires, schistes et calc-schistes) et largement drainés par les torrents comme en atteste les larges deltas. Le suivi des

transferts de matériel du bassin versant vers le lac de 2007 à 2009 a permis de montrer que les flux détritiques sont générés par des événements de précipitations d'intensité supérieures à 8 mm/h (Giguet-Covex, 2010). L'accumulation sédimentaire du Lac d'Anterne est ainsi exclusivement constituée de dépôts de crue. Il a également été montré que la quantité de matériel transportée par les torrents, à l'origine des dépôts de crue, n'est pas proportionnelle à l'intensité des précipitations. En effet pour trois événements de précipitations d'intensité similaire (de 15 à 18 mm/h) au cours de l'été 2007, les épaisseurs des dépôts varient de quelques millimètres à 2 cm. Dans ce cas seule l'analyse granulométrique de la base des dépôts de crue est pertinente pour reconstituer l'intensité des événements de précipitations (Francus et al., 2002). Des mesures de granulométrie laser ont pour cela été réalisées sur les dépôts de crue supérieurs à 5 mm. En deçà de cette épaisseur, la méthode est difficilement applicable. Cependant les analyses géochimiques réalisées à haute-résolution (200  $\mu\text{m}$ ) à partir d'un scanner de carottes ont révélé un enrichissement en calcium dans la fraction grossière. Ainsi plus le sédiment est grossier, plus il est enrichi en calcium (Fig. 4A). Les teneurs relatives en calcium permettent alors d'évaluer la granulométrie relative des dépôts inférieurs à 5 mm. L'intensité des événements de crue a donc pu être reconstitué à partir de la granulométrie laser pour les dépôts supérieurs à 5 mm et de la géochimie (calcium) pour les dépôts inférieurs à 5 mm (Giguet-Covex et al., 2012 ; Fig. 5). La datation du sédiment a été réalisée à partir de la mesure de radioéléments ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) et de la corrélation de remaniements gravitaires avec des séismes historiques pour les 300 dernières années (Arnaud et al., 2002). Elle a ensuite été étendue sur les 10 000 dernières années à partir de 24 âges  $^{14}\text{C}$ , mesurés sur macro-restes de végétaux terrestres (Giguet-Covex et al., 2012). Pour la comparaison avec les résultats du lac d'Allos, seuls les 1400 dernières années sont présentées ici. Au total 1862 crues associées à des événements de précipitations modérées à intenses ont été détectées au cours des 1400 dernières années, ce qui représente un temps de retour moyen inférieur à 1 an sur cette période. Ceci suggère un seuil d'intensité de précipitations bien inférieur à celui du Lac Blanc pour que des dépôts de crues soient générés.

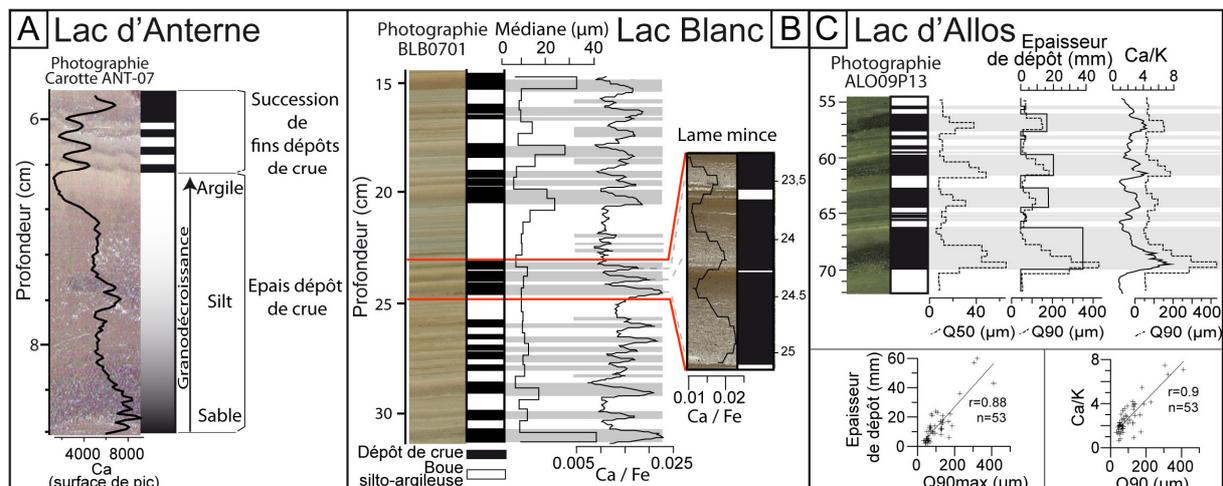


**Fig. 3** Location of the three studied lakes in the French Alps. Hydrological, geological and geomorphological characteristics of their catchment area. Bathymetric maps and location of the coring sites.

**Fig. 3** Situations des trois lacs étudiés dans les Alpes Françaises. Caractéristiques hydrologiques, géologiques et géomorphologiques des bassins versants. Carte bathymétriques et sites de carottage

## LE LAC D'ALLOS

Le Lac d'Allos (ALO, 44°14'N, 6°42'30''E, 2230 m ; Fig. 3), situé dans le massif du Mercantour, a été investigué pour caractériser l'influence du climat méditerranéen sur l'activité torrentielle. Des substrats érodables sont présents dans le bassin versant, comme les calcaires fracturés dans la partie sud et surtout des épais plaquages morainiques dans la partie nord. L'érosion et le transport de ces matériaux sont bien marqués par la présence de deltas aux débouchés des torrents de la Source et du Laus. Seuls les résultats issus des carottes prélevées dans le bassin nord sont présentés ici car ce sont ceux qui permettent de renseigner la plus longue période de temps. Comme au Lac Blanc, le sédiment est constitué de dépôts granodécroissants intercalés dans une boue silto-argileuse (Fig. 4B). Cependant pour ce site tous les dépôts granodécroissants sont attribués à une origine torrentielle, en raison de leurs caractéristiques granulométriques et géochimiques. L'absence de remaniement gravitaire majeur est également supportée par l'exploration sismique. Le rapport géochimique Ca/K permet également de suivre l'évolution granulométrique à haute-résolution (Fig. 4B) et ainsi de détecter des dépôts de crue de quelques millimètres seulement. Au total 160 dépôts de crue ont ainsi été identifiés. Par ailleurs il est apparu une relation significative entre la fraction grossière de la base des dépôts de crue et leur épaisseur. Il est alors possible d'estimer de façon fiable l'intensité des événements à partir de l'épaisseur des dépôts. La datation de cette séquence a été réalisée à partir de la mesure de radioéléments ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) et de trois âges  $^{14}\text{C}$  réalisés sur macro-restes de végétaux terrestres. La comparaison des âges obtenus pour les plus récents dépôts de crue avec les dates des crues historiques a révélé une bonne concordance, supportant le calendrier de crues (Fig. 5). Les 160 dépôts de crue se répartissent sur les 1400 dernières années, ce qui représente un temps de retour moyen de l'ordre de 8,5 ans. Soit un temps de retour moyen supérieur aux lacs Blanc et d'Anterne.



**Fig. 4** Characterization of flood deposits from grain size and geochemical analyses (A, B et C) and detailed investigation of relationships between the thickness, the coarse percentile (Q90) and a geochemical ratio (C)

**Fig. 4** Caractérisation des dépôts de crues à partir d'analyses granulométriques et géochimiques (A, B et C) et investigation détaillée des relations entre l'épaisseur, le percentile grossier (Q90) et un rapport géochimique (C)

## CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ALEA TORRENTIEL ; QUELLE RELATION ?

A partir de l'étude des trois sites présentés, nous disposons de trois calendriers de crue couvrant de 300 à 1400 ans. Par ailleurs nous disposons également de séries de température estivale pour les Alpes, élaborées à partir de l'homogénéisation de données météorologiques pour les derniers siècles (base de données Histalp, Auer et al., 2007) et à partir de l'étude de cernes d'arbre pour le dernier millénaire (Buentgen et al., 2006). Il est ainsi possible de comparer l'évolution de l'aléa torrentiel avec celle de la température sur le temps long.

## **ENSEIGNEMENTS A PARTIR DES RESULTATS DU LAC BLANC**

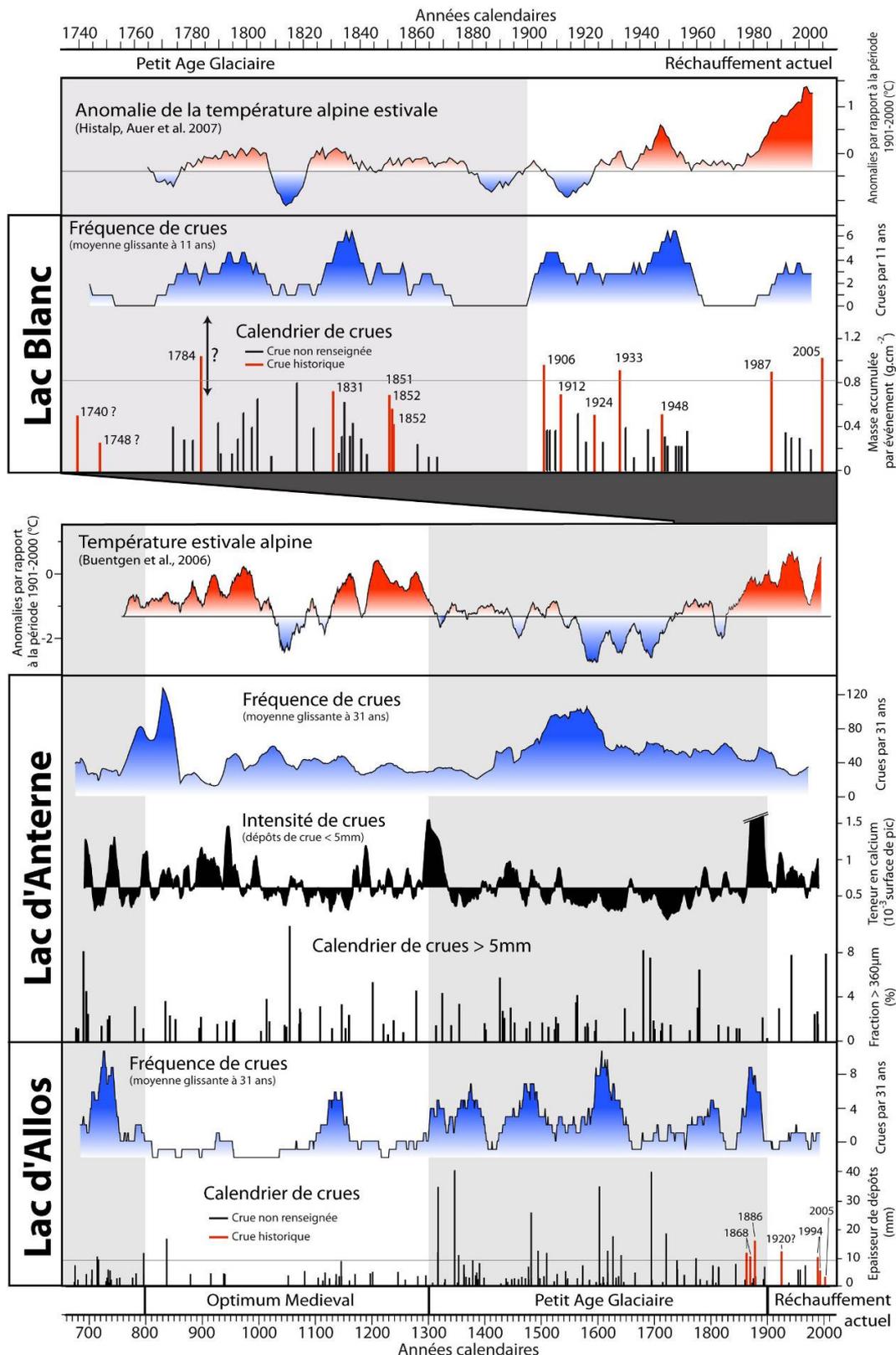
La fréquence de crue du Lac Blanc révèle de fortes variations, avec trois périodes de 20 à 30 ans (1750-1770, 1870-1900 et 1960-1980) caractérisées par l'absence d'événement et quatre périodes de haute fréquence de crue avec 5 à 7 événements en 10 ans (autour de 1800, 1830, 1910 et 1950). Il est notable que l'évolution de la fréquence semble suivre l'évolution de la température ; quand la température augmente, la fréquence augmente et vice versa. Cependant cette relation ne semble pas proportionnelle. Au cours des 20 dernières années par exemple, la température a largement augmenté, sans que la fréquence de crue n'ait pour autant atteint des maxima. De même, la température a diminué au cours des années 50 sans atteindre des valeurs très faibles, alors que la fréquence de crue a largement diminué, jusqu'à l'absence totale de crue pendant plus de 20 ans. D'autre part les dépôts de crue les plus importants (supérieurs à 0,8 g/cm<sup>2</sup>), interprétés comme les événements les plus extrêmes, apparaissent 4 fois au cours du 20<sup>ème</sup> siècle contre une fois au plus au cours des 150 années précédentes. Ces observations suggèrent une augmentation avec la température à la fois de la fréquence des événements intenses, et de l'intensité des événements de crues, ce qui est en accord avec la théorie et des simulations qui prévoient une intensification des phénomènes convectifs avec la température (par exemple Trenberth, 1999 ; Sander, 2011).

## **ENSEIGNEMENTS A PARTIR DES RESULTATS DU LAC D'ANTERNE**

A partir des estimations du temps de retour moyen, nous avons vu que les dépôts de crue du Lac d'Anterne sont presque 7 fois plus fréquents qu'au Lac Blanc. La chronique de crue du Lac d'Anterne intègre donc des événements de crue de plus faible intensité. La fréquence de crue indique des valeurs très élevées avec jusqu'à 120 crues en 30 ans (soit 4 par an), alors que des valeurs nulles ne sont jamais atteintes. D'autre part la grande tendance de cette fréquence de crue est très proche de la reconstitution des flux hydrologiques du Rhône (Giguet-Covex et al., accepté), avec de faibles valeurs pendant l'optimum médiéval et de plus fortes valeurs au cours du Petit Age Glaciaire. Ces observations sont également très proches des conditions d'humidité générale décrite dans la région à partir de reconstitutions de niveaux de lacs (Magny, 2004). D'après Magny et al. (2003) et Raible et al. (2007) l'augmentation de l'humidité généralisée sur l'Europe de l'ouest en période froide peut être le résultat d'une intensification des flux d'ouest du à l'augmentation du gradient thermique entre le pôle nord et l'équateur. Quant à l'intensité des événements reconstitués à partir de la granulométrie et de la géochimie, une augmentation apparaît plutôt au cours de l'optimum médiéval et des dernières décennies, c'est-à-dire pendant les périodes chaudes, ce qui est apparaît en accord avec l'étude du Lac Blanc. Les périodes froides prolongées favoriseraient donc une hydrologie plus active, associée à une intensification des flux d'ouest, alors que les périodes chaudes favoriseraient une intensification des événements, en raison d'une convection plus importante.

## **ENSEIGNEMENTS A PARTIR DES RESULTATS DU LAC D'ALLOS**

La fréquence de crue reconstituée au Lac d'Allos augmente significativement au cours de la période froide du Petit Age Glaciaire. Cette augmentation peut être attribuée, comme pour le Lac d'Anterne, à une intensification des flux d'ouest lié au refroidissement généralisé au cours de cette période. Simultanément à cette augmentation de la fréquence de crue apparaît une forte variabilité pluri-décennale. Aucune correspondance n'est cependant perceptible entre les pics de fréquence (autour de 1380, 1490, 1610, 1800 et 1890) et l'évolution de la température. De plus les événements les plus intenses apparaissent simultanément aux pics de fréquence. Cette déconnexion à l'échelle pluri-décennale entre la température et l'activité torrentielle (en terme de fréquence comme d'intensité) suggère que la variabilité pluri-décennale n'est pas liée à l'évolution de la température. Supportant cette hypothèse, les pics de fréquence des 300 dernières années correspondent à de longues phases négatives marquées de l'oscillation nord atlantique (Luterbacher et al., 2002). Des réanalyses météorologiques ont de plus mis en évidence des circulations atmosphériques particulières à l'origine des événements de précipitations intenses affectant les Alpes du Sud (par exemple Boudevillain et al., 2009). A l'automne, les flux de sud-ouest qui entraînent les masses d'air instables, car réchauffées et humidifiées par la



**Fig. 5** Présentation of the reconstructed flood calendar from Lake Blanc (1730-2007; Wilhelm et al., accepted), Lake Anterne (Giguet-Covex et al., accepted) and Lake Allos (650-2009) compared to homogenised and reconstructed temperature (Auer et al., 2007; Buentgen et al., 2006)

**Fig. 5** Présentation des reconstitutions de chroniques de crués réalisées à partir des lacs Blanc (1730-2007; Wilhelm et al., accepté), Anterne (Giguet-Covex et al., accepté) et Allos (650-2009) et comparaison avec les températures homogénéisées (Auer et al., 2007) et reconstituées (Buentgen et al., 2006)

Méditerranée encore chaude, vers les côtes et les reliefs où la convection peut se développer. Ces observations suggèrent que la température joue un rôle prédominant à l'échelle pluri-centennale sur l'activité torrentielle dans les Alpes du Sud. Alors que la variabilité pluri-décennale serait plutôt associée à la variabilité nord-atlantique.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude des séquences sédimentaires des lacs d'Anterne, Blanc et Allos, situées à haute altitude et dominées par les flux détritiques, a montré qu'il est possible de retrouver des dépôts résultant des crues passées. A partir de l'analyse conjointe de la granulométrie et de la géochimie, il a également été possible de détecter des dépôts de crue de l'ordre du millimètre seulement. L'intensité des crues passées a pu être reconstituée à partir de traceurs géochimiques ou de l'épaisseur des dépôts, en fonction des contextes géomorphologiques et sédimentaires. Trois calendriers de crue ont ainsi été reconstitués et renseignent sur l'évolution de l'activité torrentielle au cours des derniers siècles (Lac Blanc) aux derniers millénaires (Lacs d'Anterne et d'Allos). La comparaison de ces calendriers de crue avec la température suggère des relations complexes, dépendant de la sensibilité des sites et des échelles de temps investiguées. Des modèles distincts d'évolution de l'activité torrentielle se dessinent ainsi entre les Alpes du Nord et du Sud. Des études en cours sur le Lac Blanc (massif des Aiguilles Rouges) et le Lac d'Eychauda (massif des Ecrins) devraient permettre d'affiner ces modèles dans un futur proche. Cependant il apparaît déjà que l'évolution de l'intensité des crues en fonction de la température diverge entre le Nord et le Sud des Alpes françaises, suggérant une régionalisation des effets du réchauffement global sur l'activité torrentielle.

## REFERENCES

- Allignol F., Arnaud F., Champagnac J.D., Delannoy J.J., Deline P., Fudral S., Paillet A., Ployon E., Ravanel L., Saulnier G.M., Wilhelm B. (2008). Etude intégrée du bassin versant du Vorz (Belledonne, Isère) consécutive à la crue des 22 et 23 août 2005. Rapport scientifique, Laboratoire EDYTEM, Le Bourget du Lac, 202 p.
- Auer I., Böhm R., Jukovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J.M., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stasny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Szentimrey T., Cengar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., Nieplova E. (2007). HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *Int. J. Climatol.* 27: 17–46.
- Arnaud F., Lignier V., Revel M., Desmet M., Pourchet M., Beck C., Charlet F., Trentesaux A., Tribovillard N. (2002). Flood and earthquake disturbance of 210Pb geochronology (Lake Anterne, North French Alps). *Terra Nova* 14: 225–232.
- Barrerra A., Llast M.C., Vallve M.B. (2006). Estimation of extreme flash flood evolution in Barcelona County from 1351 to 2005. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6: 505–518.
- Beniston M., Stephenson D.B. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change* 44: 1–9.
- Beniston M. (2006). August 2005 intense rainfall event in Switzerland: Not necessarily an analog for strong convective events in a greenhouse climate. *Geophysical Research Letters* 33: L05701 DOI:10.1029/2005GL025573.
- Blanchemanche P. (2009). Crues historiques et vendanges en Languedoc méditerranéen oriental : la source, le signal et l'interprétation. In : *Changement global, effets locaux : Le Petit Age Glaciaire dans le Sud de la France : Impacts morphogéniques et sociétaux.* *Archéologie du Midi Médiéval* 27: 225-235.
- Boudevillain B., Argence S., Claud C., Ducrocq V., Joly B., Lambert D., Nuissier O., Plu M., Ricard D., Arbogast P., Berne A., Chaboureau J.P., Chapon B., Crépin F., Delrieu G., Doerflinger E., Funatsu B.M., Kirstetter P.E., Masson F., Maynard K., Richard E., Sanchez E., Terray L., Walfpersdorf A. (2009). Cyclogenèses et précipitations intenses en région méditerranéenne: origines et caractéristiques. *La Météorologie* 66: 18-28.

- Buengtgen U., Frank D.C., Nievergelt D., Esper J. (2006). Summer Temperature Variations in the European Alps, A.D. 755–2004. *J. Clim.*, 19: 5606–5623.
- Beierle B.D., Lamoureux S.F., Cockburn J.M.H., Spooner I. (2002). A new method for visualizing sediment particle size distributions. *Journal of paleolimnology* 27: 279–283.
- Brazdil R., Pfister C., Wanner H., Von Storch H., Luterbacher J.R. (2005). Historical climatology in Europe – the state of the art. *Clim change* 70: 363–430.
- Buzzi A., Tartaglione N., Malguzzi P. (1998). Numerical Simulations of the 1994 Piedmont Flood: Role of Orography and Moist Processes. *Monthly Weather Review* 126: 2369–2383.
- Cœur D. (2003). La maîtrise des inondations dans la plaine de Grenoble (XVIIe-XXe siècle) : Enjeux techniques, politiques et urbains. Thèse Université Pierre Mendès France Institut d'Urbanisme de Grenoble 342p.
- Djerboua A. (2001). Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes Franco-italiennes – Prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues Thèse Institut National Polytechnique de Grenoble. 214p.
- Francus P., Bradley R.S., Abbott M.B., Patridge W., Keimig F. (2002). Paleoclimate studies of minerogenic sediments using annually resolved textural parameters. *Geophysical Research Letters* 29(20): 1998–2002.
- Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J., Vidale P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models, *J Geophys Res-Atm* 111, D06105, DOI: 10.1029/2005JD005965.
- Giguet-Covex C. (2010). Contribution des sédiments laminés lacustres à l'étude des changements environnementaux Holocène : Approche couplée sédimentologique/géochimique à haute résolution Application à deux lacs nord-alpins. Thèse Univ. De Savoie, 313p.
- Giguet-Covex C., Aranud F., Enters D., Poulénard J., Millet L., Francus P., David F., Wilhelm B., Delannoy J.J. (2012). Decoupled frequency and intensity records of high altitude torrential floods over the last 4 000 years in NW European Alps. *Quaternary Research*. 77(1): 12–22.
- IPCC Kostaschuck R.A., MacDonald G.M. (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate change 2007—the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kieffer-Weisse A. (1998). Etude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes Françaises), Méthode de cartographie des précipitations extrêmes. Thèse de doctorat, Institut National de Polytechnique, Grenoble. 309pp.
- Kieffer-Weisse A. and Bois P. (2001). Estimation de paramètres statistiques des précipitations extrêmes dans les Alpes françaises. *La Houille Blanche* 1:62–70.
- Luterbacher J., Xoplaki E., Dietrich D., Jones P.D., Davies T.D., Portis D., Gonzalez-Rouco J.F., von Storch H., Gyalistras D., Casty C. and Wanner H. (2002). Extending North Atlantic Oscillation Reconstructions Back to 1500. *Atmos. Sci. Lett.*, 2, 114–124.
- Merz R. and Blöschl G. (2003). Regional flood risk—what are the driving processes? *Water Resour. Syst.- Hydrol. Risk, Manag. and Dev.* IAHS Publ. 28: 49–58.
- Meunier M. (1990). La catastrophe du Grand Bornand : crue torrentielle du Borne le 14 juillet 1987. *Revue de Géographie Alpine* 78(1): 103 – 113.
- Milly P.C.D., Dunne K.A., Vecchia A.V. (2002). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438(17): 347–350.
- Magny M., Bégeot C., Guiot J., Peyron O. (2003). Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases. *Quaternary Science Reviews* 22: 1589–1596.
- Magny M. (2004). Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. *Quaternary International* 113: 65–79.
- Moreau K., Roumagnac A. (2010). Feedback on floods in Var, south of France, 15th June 2010 : different societal impacts and responses linked to levels of prevention, organization and information. 12th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Corfu Island Greece, September 2010.
- OcCC (Organe consultatif sur les Changements Climatiques) (2007). *Les changements climatiques et la Suisse en 2050 : Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie*. Bern, 168p.
- OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) (2007). *Changement climatique dans les Alpes européennes – Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*. Sous la direction de Shardul Agrawala. Paris, 136p.

- ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) (2008). Changements climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels. Rapport Technique N°1 de l'ONERC. Paris, 87p.
- Raible C.C., Yoshimori M., Stocker T.F. and Casty C. (2007). Extreme midlatitude cyclones and their implications for precipitation and wind speed extremes in simulations of the Maunder Minimum versus present day conditions. *Clim Dyn* (2007) 28: 409–423.
- Sturm M and Matter A (1978) Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland): deposition of clastic detritus by density currents. *Spec. Publis int. Ass Sediment. 2*: 147-168.
- Trenberth K.E. (1999). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change* 42: 327-339.
- Wihelm B., Arnaud F., Enters D., Allignol F., Legaz A., Magand O., Revillon S., Giguët-Covex C., Malet E. (in press) Does global warming favour the occurrence of extreme floods in European Alps? First evidences from a NW Alps proglacial lake sediment record. *Climatic Change*: <http://www.springerlink.com/content/50pg316u137841v4/>