

Vulnérabilité et résilience des géo-systèmes de montagne (Alpes maritimes) face au changement climatique et à l'action humaine : un héritage holocène récent ?

I. Contexte de la recherche

Les milieux montagnards sont des géo-systèmes fragiles, soumis à d'importants gradients géomorphologiques, climatiques et écologiques. Par conséquent, tout changement environnemental - qu'il soit d'origine naturelle ou anthropique - déstabilise profondément ces milieux (Demangeot, 2002). La reconstitution de l'histoire paléo-environnementale de ces zones de montagnes représente alors un enjeu d'importance dans la compréhension des mécanismes de résilience de ces systèmes. En 2009, un carottage a été effectué dans le remplissage sédimentaire du lac de Millefont (Alpes Maritimes, 2200 m d'altitude, voir figure 1) qui a permis, pour la première fois dans la région, de mener une étude pluridisciplinaire sur cette problématique d'importance majeure (Brisset, 2010). Ce travail a montré que l'environnement montagnard du lac de Millefont était soumis à des crises détritiques récurrentes, liées en partie à des activités humaines pluriséculaires (Pagès, 2009). Les analyses sédimentologiques, radiométriques, géochimiques, et polliniques ont permis de retracer en détail l'évolution du lac et de son bassin versant depuis 5 millénaires

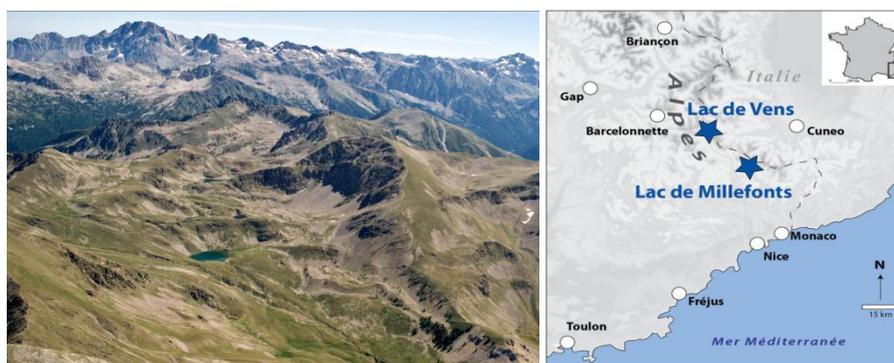


Figure 1 : à gauche, le lac de Millefont et son bassin versant dénudé. Localisation des deux sites proposés pour cette étude

- Une première phase de relative stabilité (4800-4300 cal BP) interrompue par un événement brutal de déstabilisation du système (vers 4300 cal BP)
- Puis une dégradation progressive de l'environnement et des paysages jusqu'à 1500 cal BP
- Enfin, une déstabilisation irréversible des versants jusqu'à nos jours, (avec un accroissement du détritisme et la destruction des écosystèmes forestiers)

Comme les nombreux témoignages archéologiques présents dans le vallon le laissent supposer (Suméra, 2007 ; Suméra et al, 2008 ; Pagès, 2009), l'Homme a joué un rôle majeur dans la dégradation dramatique de l'environnement : les récents travaux sur le site (Brisset et al, 2010, accepté) confirment que plusieurs épisodes détritiques sont synchrones des phases d'occupation humaine autour du lac. Pourtant, même si de fortes activités humaines (pastoralisme, activités minières) entre le Néolithique et le Haut Moyen-âge sont attestés dans la région, le rôle de la variabilité climatique holocène dans la dégradation des paysages doit être évalué, comme cela a été testé par d'autres études dans les Alpes du nord (Schulte et al, 2009).

Le projet **HOMERE** propose d'aborder cette question à Millefont, et dans le proche site du lac de Vens carotté récemment par l'équipe GEOAZUR (Marie Revel) (Figure 1).

II. Objectifs et description du projet

Les données précédemment recueillies à ce jour à Millefont n'ont pas permis d'estimer quantitativement le paléoclimat des cinq derniers millénaires. Une reconstruction fondée sur la méthode des analogues modernes (Guiot, 1990) sera effectuée à partir des données polliniques fossiles (haute résolution en cours), mais la nature

diatomitique du profil offre une nouvelle perspective d'évaluation de la variabilité climatique enregistrée dans le lac. Grâce à une méthode géochimique originale (unique en France) qui a été conjointement développée par l'équipe « Bio-indicateurs » et par le Laboratoire des isotopes stables du CEREGE, il est désormais possible de mesurer la composition isotopique en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) des frustules de diatomées et ainsi déterminer après calibration une variable climatique directe : la température (Crespin et al, 2008). L'étude taxinomique de l'exceptionnelle richesse en diatomées de l'enregistrement de Millefonds permet également de reconstruire les variations du trophisme et du pH du lac¹.

Le projet **HOMERE** a pour premier objectif d'estimer quantitativement le rôle qu'a joué le climat dans la déstabilisation du vallon de Millefonds, par :

- l'étude du $\delta^{18}\text{O}$ de la silice diatomitique sur le profil précédemment étudié à Millefonds. Grâce à ces mesures, il sera possible de déterminer la part des forçages climatiques impliqués dans l'évolution du paléoenvironnement à Millefonds, et ainsi permettre de comprendre les interactions complexes entre l'homme, son environnement et le climat pendant la seconde moitié de l'Holocène.
- l'étude taxinomique des diatomées fossiles. Ces nouvelles analyses permettront de reconstituer les changements trophiques et paléohydrologiques dans le lac.

Dans un second temps, le projet propose d'appliquer la démarche pluridisciplinaire menée à Millefonds sur le proche site du Lac de Vens (voir figure 1), également diatomitique (et dans un contexte géomorphologique comparable). Le second objectif consiste à vérifier si l'histoire paléoenvironnementale enregistrée sur le premier site a une valeur locale, ou si au contraire, le lac de Vens a subi des crises environnementales similaires, liées à des tendances climatiques plus régionales. Nous proposons donc de mener les mêmes analyses qu'à Millefonds sur un profil de 8 m prélevé en 2010 à Vens, soit :

- L'étude des diatomées fossiles et mesures du $\delta^{18}\text{O}$ sur silice biogénique
- L'étude géochimique élémentaire haute résolution
- L'étude des pollens fossiles
- Des prospections archéologiques

Ainsi, l'étude des deux sites par des proxies strictement comparables permettra :

- (a) de spatialiser la reconstitution paléoenvironnementale, et le cas échéant**
- (b) de mettre en évidence des particularismes locaux (différences dans les pratiques agro-pastorales, le taux d'occupation humaine, microclimats...)**

Le projet **HOMERE**, associant des chercheurs de l'IMEP et du CEREGE s'intégrera à trois programmes menés en collaboration avec les chercheurs des sciences humaines : le **P.C.R. « Peuplement et occupation du sol du Massif du Mercantour et de l'Argentera au cours de l'Holocène »** (financement : SRA, DRAC PACA, pilotage : F. Suméra, archéologue, Conservateur du patrimoine au Service Régional de l'Archéologie, Centre Camille Julian), le programme **FRECHALP** (financement en demande région PACA, pilotage : Florence Mocci IE, Centre Camille Julian UMR 6573), le programme **LADICIA** (financement : région PACA, pilotage : Cécile Miramont MCU, IMEP). Notre demande est également liée au programme SESAM (Aléa Sismo-gravitairE long-terme dans les Alpes Maritimes) (financement en demande, pilotage : Marie Revel, GEOAZUR, Nice). Le programme pluridisciplinaire **LADICIA**² a débuté en novembre 2010, avec pour objectif principal de retracer les interactions homme/climat/géosystème, notamment en contexte de risque climatique sur une série de lacs alpins d'altitude.

III. Réalisations prévues. Plan financier

Le tableau ci-dessous résume les analyses déjà effectuées sur les sites d'étude, celles pour lesquelles les données sont en cours d'acquisition, et celles proposées dans le cadre du projet **HOMERE**. Le projet comprend une part analytique importante : les mesures isotopiques de l'oxygène sur silice biogénique (extraction sur diatomées) sont respectivement prévues sur 7 échantillons (hors répliqués) pour Millefonds et 10 pour le site de

¹ Grâce à des fonctions de transfert et la banque de diatomées européenne (EDDI).

² Et la thèse associée, Elodie Brisset doctorante en géographie ED 355

Vens. Le coût des analyses paléocéologiques (pollen et diatomées) prend en charge exclusivement les consommables d'extraction/concentration du matériel fossile. Enfin, les mesures ITRAX sont prévues sur une archive de 5 m prélevée à Vens.

	Analyses polliniques	Datations ¹⁴ C	Etude des diatomées (taxonomie et δ ¹⁸ O)	Géochimie (ITRAX)	Prospections archéologiques
Site de Millefont	achevées	Achevées	Proposition HOMERE	achevées	Achevées
Site de Vens	En cours et proposition HOMERE	En cours	Proposition HOMERE	En cours et proposition HOMERE	En cours

a) Plan financier

Le tableau ci-dessous détaille le plan financier du projet.

Work package	Montant HT
Mesures isotopiques sur frustules de diatomées sur le site de Millefont	1400 euros
Analyses des diatomées fossiles sur le site de Millefont	500 euros
Mesures isotopiques sur frustules de diatomées sur le site de Vens	2000 euros
Analyses polliniques sur le site de Vens	1000 euros
Analyses des diatomées fossiles sur le site de Vens	600 euros
Mesures ITRAX du profil de Vens	2500 euros
Total	8000 euros

b) Collaboration entre les équipes

Les membres du projet **HOMERE** seront en étroite collaboration lors de l'acquisition des données, afin de réévaluer la stratégie d'échantillonnage, à la lueur des résultats préliminaires. De plus, le consortium se réunira régulièrement pour confronter chaque approche en vue de :

- 1) finaliser plusieurs publications,
- 2) rédiger un programme de type INTERREG ou ANR blanc
- 3) présenter les résultats aux gestionnaires des risques naturels (parcs, ONF-RTM, CEMAGREF) et vulgariser pour le grand public

A terme, la collaboration doit se poursuivre autour de plusieurs archives paléolacustres et tourbeuses : cette mutualisation des compétences permettrait pour la première fois d'intégrer à la fois les géosciences, les sciences paléocéologiques et les sciences humaines autour de reconstructions paléo-environnementales en région PACA. L'appel d'offres ECCOREV représente l'opportunité de formaliser un tel groupe de recherche interdisciplinaire dans les Alpes méridionales, tout en s'appuyant sur :

- (a) un programme en cours et deux en cours d'évaluation,
- (b) des archives sédimentaires exceptionnelles (diatomite),
- (c) un solide corpus de données déjà acquises.
- (d) une thèse en cours (E. Brisset) : thèse cofinancée par la Région PACA sur « *les impacts des changements climatiques et de l'anthropisation sur les environnements des lacs d'altitudes dans les Alpes du Sud* »

Enfin, les connaissances accumulées pourront être valorisées dans le cadre de la gestion des espaces naturels d'altitude. Les phénomènes érosifs, parfois violents (tels que les crues, laves torrentielles, glissements gravitaires) menacent de manière récurrente l'espace montagnard habité, au point que les mesures préventives concernent à présent l'ensemble des bassins versants alpins, au travers notamment des PPR³. La restauration des terrains de montagne représente d'ailleurs une des missions majeures de l'ONF (service RTM) dans les Alpes pour laquelle « *l'héritage holocène* » que le projet **HOMERE** se propose de reconstituer, constitue un recul temporel nécessaire et précieux. Nous proposerons au cours du projet, et à son terme, une présentation des résultats à une large audience, depuis le grand public jusqu'aux gestionnaires eux-mêmes. Les

³ Plans de Prévention des Risques.

travaux liés à LADICIA seront notamment présentés lors du colloque inaugural (co-organisé par D. Bourlès CEREGE) du centre **S.E.O.L.A.N.E.**⁴, du 11 au 17 septembre 2011 à Barcelonnette.

IV. Description du consortium

a) Liste des participants, spécialité et implication

Nom	Prénom	Statut	Spécialité	Implication	Equipe
Bard	Edouard	Professeur au Collège de France CEREGE	Géochimie élémentaire	<1 % expert	3
Belkacem-Doume	Dahvya	Technicienne IMEP	Paléoécologie	10 %	2
Brisset	Elodie	Doctorante IMEP/CEREGE	Paléoenvironnement Géographie	15%	2
Garcia	Marta	AI CNRS CEREGE	Géochimie élémentaire	5%	3
Guiter	Frédéric	MCU IMEP	Paléoécologie continentale	20%	2
Miramont	Cécile	MCU IMEP	Géographie. Géomorphologie	5%	2
Pailles	Christine	IE CNRS CEREGE	Diatomées, $\delta^{18}\text{O}$ de la silice	30%	1
Sylvestre	Florence	DR2 IRD CEREGE	Diatomées, $\delta^{18}\text{O}$ de la silice	15%	1
Sonzogni	Corinne	IE CNRS CEREGE	Mesure du $\delta^{18}\text{O}$ de la silice	5%	3
Tachikawa	Kazuyo	CR1 CEREGE	Géochimie élémentaire	<1 % expert	3

b) Présentation des équipes

Equipe 1 Bio-indicateurs- Diatomées: CEREGE (UMR 6635-membre d'ECCOREV) Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, Europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence

C.Paillès (I. E., porteur du projet), F. Sylvestre (DR2 -IRD spécialiste en diatomées et $\delta^{18}\text{O}$)

CV du porteur : C. Paillès est ingénieur d'études dans l'équipe bio-indicateurs du CEREGE, spécialisée dans l'étude des diatomées. Ses travaux portent sur la caractérisation des systèmes aquatiques passés et l'évaluation de la variabilité climatique au cours du temps par la double approche taxinomique et géochimique. Elle a participé avec Florence Sylvestre au développement de l'analyse de la composition isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) de la silice dans les diatomées : suivi des cultures de diatomées, extraction et purification, préparation d'eaux enrichies en isotopes, développement de nouveaux protocoles de nettoyage des diatomées, séparation des diatomées en fonction de leur taille et de leur densité par SPLITT (séparateur de particules à flux laminaire) et à la calibration de la relation thermo-dépendante du facteur de fractionnement entre le « $\delta^{18}\text{O}$ diatomées » et le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau. Cette méthode, unique en France, permet de quantifier les paléo-températures atmosphériques et de tracer l'origine des apports en eau dans les lacs.

Publications les plus pertinentes pour le projet

Crespin J., Sylvestre F., Alexandre A., Sonzogni C., Paillès C., Perga M.E., 2010. Re-examination of the thermo-dependent relationship between $\delta^{18}\text{O}$ diatoms and $\delta^{18}\text{O}$ lake water. Implications for palaeoclimatic applications. *Journal of Paleolimnology*, (2010).

Crespin J., Alexandre A., Sylvestre F., Sonzogni C., Paillès C., Garreta V., 2008. IR laser extraction technique applied to oxygen isotope analysis of small biogenic silica samples. *Analytical chemistry*, 80: 2372-2378.

Battarbee R.W., Juggins S., Gasse F., Anderson N.J., Bennion H., Cameron N.G., Ryves D.B., Paillès C., Chalié F., Telford R., 2001. European Diatom Database (EDDI). An information system for palaeoenvironmental reconstruction. ECRC, University College London Research Report N°81, 107p.

Equipe 2 Paléoécologie et paléoenvironnements : IMEP (UMR CNRS-IRD 6116 membre d'ECCOREV) Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie, bâtiment Villemin, euro pôle de l'Arbois; BP 80 13545 Aix en Provence, cedex 04

F. Guiter (MCU, paléoécologie, porteur du projet), D. Belkacem-Doume (TCN), C. Miramont (MCU, géomorphologue, dendroécologue), E. Brisset (doctorante en paléoenvironnement)

CV du porteur : F. Guiter est maître de conférences à l'Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III). Ses enseignements couvrent la licence (Sciences de la Vie et Biologie des Populations et Ecologie) et le Master R BIOECO (Master SET) en écologie végétale, botanique et paléoécologie du Quaternaire.

⁴ **S.E.O.L.A.N.E.** : Site d'Etude, d'Observation, de Logement et d'Accueil autour de la Nature et de l'Environnement. Ce centre ouvrira ses portes mi 2011 à la communauté universitaire (enseignants-chercheurs, chercheurs, doctorants) ainsi qu'aux professionnels (bureaux d'études, gestionnaires) autour des thématiques « *risques naturels & vulnérabilités des écosystèmes montagnards* ».

Spécialisé en palynologie continentale, ses recherches sont axées sur les reconstitutions paléoécologiques pluridisciplinaires sur des archives lacustres et palustres couvrant les 15 derniers millénaires, en zone méditerranéenne (Provence, Afrique du nord) et péri-méditerranéenne (Pyrénées orientales, Alpes du sud) afin de comprendre les dynamiques des écosystèmes en relation avec les forçages climatiques et/ou anthropiques.

Publications les plus pertinentes pour le projet

Ponel P., Court-Picon M., Badura M., Guiter F., Beaulieu (de) J.-L. ; Andrieu-Ponel V., Djamali M., Leydet M., Gandouin E., Buttler A., in press. Holocene history of Lac des Lauzons (2180 m a.s.l.), reconstructed from multiproxy analyses of Coleoptera, plant macroremains and pollen (Hautes-Alpes, France). *The Holocene*, in press.

Guiter F., Andrieu-Ponel V., Digerfeldt G., Reille M., Beaulieu (de) J. L. & Ponel P., 2005. *Vegetation history and lake-level changes from the Younger Dryas to the present in Eastern Pyrenees (France): pollen, plant macrofossil and sedimentological analyses from Lake Racou (2000 m a.s.l.)*. *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, 99-118.

Guiter F., Beaulieu (de) J.-L., Andrieu-Ponel V., Ponel P., Nicoud G., Blavoux B., 2005. *Impact anthropique sur la végétation de la région d'Evian depuis le Néolithique moyen : l'enregistrement pollinique de la Beunaz (971 m n.g.f., Haute-Savoie, France. Palynological evidence of anthropogenic pressure on vegetation dynamics in the Evian area since the middle Neolithic*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série Biologie*, 328, 7: 661-673

Equipe 3 Géochimie et Paléocéanographie : CEREGE (UMR 6635 membre d'ECCOREV) Europôle de l'Arbois, BP80 13545 Aix-en-Provence

K. Tachikawa (CR1 CNRS, géochimie), M. Garcia (AI CNRS, géochimie), E. Bard (Pr. Collège de France, géochimie), C. Sonzogni (IE CNRS, géochimie).

La compétence scientifique et la qualité des analyses instrumentales de l'équipe « Géochimie et Paléocéanographie » sont reconnues au niveau international. L'acquisition d'un scanner à fluorescence des rayons X (XRF, ITRAX) en 2008 permet de renforcer les études sur le climat continental : l'analyse multi-élémentaire rapide et non-destructive d'archives lacustres par ITRAX fournit l'information sur la variabilité temporelle de production en opale, de matière organique, de sources et de nature de fraction terrigène, et de l'apport anthropique en résolution spatiale aussi fine que 200 µm. L'arrivée de M. Garcia au CEREGE en 2009 optimise l'emploi de temps d'ITRAX et la formation d'utilisateurs. La collaboration entre notre équipe et l'IMEP a commencé dans le cadre du stage Master 2 d'E. Brisset. Dans le cadre de ce projet, nous allons fournir notre expertise pour interpréter les données XRF dans le contexte du changement environnemental.

Publications les plus pertinentes pour le projet

Boning, P., Bard, E. and Rose, J., 2007. Toward direct, micron-scale XRF elemental maps and quantitative profiles of wet marine sediments. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 8(5): Q05004.

Leduc, G., Vidal, L., Tachikawa, K., Rostek, F., Sonzogni, C., Beaufort, L. and Bard, E., 2007. Moisture transport across Central America as a positive feedback on abrupt climatic changes. *Nature*, 445: 908-911.

Tachikawa, K., Vidal, L., Sonzogni, C. and Bard, E., 2009. Glacial/interglacial sea surface temperature changes in the Southwest Pacific ocean over the past 360 k years. *Quaternary Science Reviews*, 28: 1160–1170.

V. Références bibliographiques

Brisset E., Guiter F., Miramont C., Arnaud F., Delhon C., Wilhelm B., Disnar J.-R., Paillès (soumis) Multi-proxy investigation on the lacustrine profile from Lac Petit (Mercantour, 2200 m a.s.l.) : when man and climate trigger sedimentation crisis.

Brisset E., Guiter F., Miramont C., Arnaud F., Delhon C., Guibal F., Wilhelm B., Suméra F., 2010 Les relations Homme-milieu depuis 5000 ans à travers un enregistrement lacustre d'altitude (Lac Petit, 2200m, Mercantour, France), Communication orale, 23ème Réunion des Sciences de la Terre (RST), Bordeaux, France.

Brisset E., 2010 Dynamiques et déstabilisations d'un géosystème d'altitude depuis 5000 ans. Mémoire de Master 2 Recherche SET, 52p.

Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J., Data Contributors, 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews* 22, 1701–1716.

Demangeot J. (ed), 2002. Les milieux "naturels" du globe. Ed 2ième. Paris.

Guiot J., 1990. Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 80, 49–69.

Pagès G., 2009. Le Clouté Valdeblore, rapport de fouilles programmées. SRA, PACA, Aix en Provence, 42p.

Schulte L., Veit H., Francisc Burjachs F., Julià R., 2009. Lütischine fan delta response to climate variability and land use in the Bernese Alps during the last 2400 years. *Geomorphology*, 108, 1-2, 2009, 107-121

Suméra F., 2007. Rapport de prospection et de fouilles, 2004, vallon de Millefont, Valdeblore, Alpes-Maritimes. In:Aix en Provence, SRA PACA, 130p.

Suméra F., Blanc F., Cavana E., Cholet V., Delhon C., Gautier M. & Martin L., 2008. Rapport de sondage, commune de Valdeblore, Campagne 2008. Rapport final d'Opération. In:Aix en Provence, SRA PACA, 30p.