



HAL
open science

Les lacs, miroirs du passé, du dernier Interglaciaire à l'Anthropocène : Reconstitutions paléoclimatiques et trajectoires fonctionnelles.

Laurent Millet

► To cite this version:

Laurent Millet. Les lacs, miroirs du passé, du dernier Interglaciaire à l'Anthropocène : Reconstitutions paléoclimatiques et trajectoires fonctionnelles.. Milieux et Changements globaux. Université de Bourgogne Franche-Comté, 2018. tel-03565147

HAL Id: tel-03565147

<https://hal.science/tel-03565147>

Submitted on 10 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches

Présenté par

Laurent Millet

Les lacs, miroirs du passé, du dernier Interglaciaire à l'Anthropocène : *Reconstitutions paléoclimatiques et trajectoires fonctionnelles.*



Présenté à Besançon le 17 avril 2018

Devant le jury composé de :

Nathalie Dubois, Professeur, EAWAG, ETH-Zürich

Daniel Ariztegui, Professeur, Dep. of Earth Sciences, Univ. Geneva

Adam Ali, Professeur, UMR 5554 ISEM, Université de Montpellier

Didier Galop, Directeur de Recherche, UMR 5602 GEODE, Toulouse

Michel Magny, Directeur de Recherche, UMR 6249 Chrono-Env.,
Besançon

SOMMAIRE

Introduction	3
Chapitre I : Changements climatiques, forçages et impacts environnementaux au cours des 15 000 dernières années.	6
<i>I.A. Reconstituer le climat en cherchant la petite bête</i>	6
I.A.1 Les Chironomidae et leurs restes subfossiles	6
A.2 Les Chironomidae, marqueurs climatiques	7
<i>I.B. Stratégie mise en œuvre : choix des sites et des fenêtres chronologiques, approches multiproxies</i>	9
I.B.1 Maximiser l'influence du climat	9
I.B.2 d'une expertise disciplinaire forte à l'approche multiproxies	10
<i>I.C La reconstitution des températures du Tardiglaciaire</i>	11
I.C.1 Le Tardiglaciaire : définition et enjeux associés	11
I.C.2 Des données inédites sur les températures estivales Tardiglaciaires dans le Jura, les Pyrénées, les Alpes, et le Massif Central.	13
I.C.3 Impacts du climat sur l'environnement	15
I.C.4 Gradients climatiques européens et facteurs de forçages	16
<i>I.D Reconstitution du climat de l'Ère Commune</i>	18
I.D.1 Les Alpes du Nord : les enregistrements des lacs d'Anterne et des Cheserys	18
I.D.2 Le Sud-Ouest du Groenland	20
Chapitre II : Impacts de l'homme sur le fonctionnement trophique des écosystèmes lacustres	23
<i>II.A Concepts et méthodes</i>	24
II.A.1 Le fonctionnement trophique des lacs et les impacts anthropiques	24
II.A.2 Les marqueurs étudiés	25
<i>II.B Equilibre et rupture dans le fonctionnement trophique des lacs au cours du dernier millénaire</i>	28
II.B. 1 Aperçu synthétique des grandes ruptures dans le fonctionnement des lacs étudiés	29
II.B.2 Reconstitutions diachroniques des trajectoires fonctionnelles des grands lacs : l'exemple des lacs périalpins	32
II.B.3 Trajectoires fonctionnelles des petits lacs de montagne : l'exemple du lac de Narlay	38
	1

<i>II.C Impacts sur les sources et les voies de transfert du carbone dans les réseaux trophiques benthiques</i>	41
II.C.1 Apparition et/ou développement de la méthanotrophie sous influence anthropique	41
II.C.2 la méthanotrophie : facteurs de contrôles internes et externes	42
Chapitre III : Perspectives	45
<i>III.A Une approche renouvelée pour la reconstitution quantitative du climat</i>	45
III.A.1 Quel référentiel dans l'Anthropocène ?	45
III.A.2 Développement d'une fonction de transfert « sub-actuelle » pour l'Europe	46
III.A.3 La composition en isotopes stable de l'oxygène de la chitine comme proxy climatique	47
<i>III.B Les changements du climat au cours du dernier cycle climatique : approche intégrée et à haute résolution</i>	48
III.B.1 Le Bergsee : un enregistrement unique de l'Éémien au Tardiglaciaire	49
III.B.2 Holocène : Alpes, Pyrénées, Groenland, et Canada	53
<i>III.C Trajectoire fonctionnelle des lacs, facteurs de stress et impacts</i>	55
III.C.1 Une stratégie interdisciplinaire multi-échelles	55
III.C.2 Trajectoire des systèmes : facteurs de perturbations et état des systèmes	57
III.C.3 séquestration du carbone et méthanotrophie dans les lacs carbonatés	60
III.C.4 Répondre aux enjeux de gestion	61
Références	64
Animation et encadrement de la Recherche	70
Curriculum Vitae	74
Publications	78

Introduction

La paleolimnologie ou les lacs miroirs du passé

Mes recherches s'inscrivent dans le cadre général de la paleolimnologie qui, dans sa définition la plus large, embrasse l'étude des archives sédimentaires lacustres, véritables mémoires des écosystèmes, pour la reconstitution (1) de l'histoire climatique et environnementale de l'échelle locale (bassin-versant) à une échelle plus régionale, et (2) des trajectoires écologiques des écosystèmes lacustres, ces deux objectifs étant complémentaires et souvent combinés.

Les sédiments, en s'accumulant au fond des lacs, le plus souvent de façon continue, lente et régulière, piègent et conservent une grande diversité d'indices des environnements et des climats passés. Le prélèvement de ces archives sédimentaires, leur datation et l'étude de ces différents marqueurs biotiques (restes de la faune et de la flore terrestres et aquatiques), et abiotiques (granulométrie, spectro-colorimétrie, géochimie ...) nous fournissent ainsi une image, parfois floue ou déformée, mais toujours essentielle et irremplaçable, des conditions environnementales et climatiques pour des périodes anciennes où les données d'observation (monitoring, suivis ...) sont lacunaires, discontinues ou absentes.

Le fonctionnement actuel des écosystèmes lacustres (structuration des réseaux trophiques, sources et voies de transfert de carbone et d'énergie dans l'édifice trophique, biodiversité ...) et sa vulnérabilité face au changement global en cours dépendent bien évidemment de caractéristiques typologiques intrinsèques (géologie du bassin-versant, profondeur, altitude ...), de l'ambiance climatique et de l'occupation des sols contemporaines, mais reflètent également -et c'est un aspect qui a été longtemps négligé par les « néolimnologues » (spécialistes du fonctionnement actuel des lacs, Smol 1991)- son histoire récente ou plus ancienne. Des perturbations passées, aujourd'hui oubliées ou ignorées, ont en effet pu diminuer la résilience des écosystèmes face au changement global et augmenter la probabilité d'une bascule fonctionnelle majeure du système vers un état stable « dégradé » et une perte - difficilement réversible - des biens et services écosystémiques associés (cf. théorie des états stables alternatifs, Scheffer et al. 2001).

Les lacs et leurs sédiments sont donc des miroirs à plusieurs facettes du passé proche (échelle annuelle, décennale) et plus lointain (échelle séculaire à pluri-millénaire).

Apports du temps long

L'intérêt et l'importance des reconstitutions paléoclimatiques n'est aujourd'hui plus à démontrer tant cette approche est prise en compte et intégrée à la recherche sur le climat. Comme synthétisé par Mock (2007), l'étude des climats passés contribue à notre compréhension du changement climatique en :

- restituant les amplitudes, les temporalités et les étendues spatiales des changements climatiques pour des périodes où les données instrumentées sont absentes, imprécises ou discontinues.
- identifiant les facteurs de forçage et les mécanismes d'une variabilité climatique naturelle et par contraste en contribuant à mettre en évidence l'influence humaine récente.
- permettant, dans une approche de type « back-testing », d'évaluer la pertinence et d'augmenter la précision et la fiabilité des prévisions pour le futur fournies par les modèles de circulation générale.

- indiquant le contexte climatique de l'histoire de l'environnement (biodiversité, paysage, érosion ...) et des sociétés (habitats, ressources, adaptation, migrations ...). Elle participe ainsi à alimenter la problématique des relations Homme-Environnement sur la longue durée.

A *contrario*, comme souligné par John Smol en 1990 dans sa conférence inaugurale de la session « Aquatic Ecology and Palaeolimnological Interpretation » au 6^{ème} Symposium de Paleolimnologie, des passerelles restent à construire et consolider entre la paleolimnologie et la néolimnologie.

L'auteur plaide pour la complémentarité des approches et illustre l'importance des données paleolimnologiques pour la compréhension du fonctionnement actuel des systèmes en reprenant une métaphore de son ami P. DeDeckker : « *Neolimnologists are like people taking photographs of a fast train with the latest photographic equipment. They perhaps take several photographs of the train, but they don't know what the train looked like when it left the station, what trajectory the train followed before reaching cruising speed, and what it will look like on arrival.* ». Dans la communauté scientifique française, ce constat ancien reste cependant encore d'actualité même si quelques laboratoires (CARTEL, Chrono-Environnement, EDYTEM ...) ont compris la valeur ajoutée d'une approche combinant observation et retro-observation et l'ont mise en œuvre dans le cadre de projet ambitieux (Ex ANR IPER-RETRO).

Les données issues de l'étude des archives lacustres en apportant une vision à long terme complètent efficacement les données acquises dans le cadre de suivis (monitoring) et d'études en neolimnologie. Elles offrent en effet l'opportunité exclusive de répondre à des questions fondamentales concernant les états initiaux (ou de référence) des systèmes, leurs trajectoires écologiques et la réversibilité de ces évolutions fonctionnelles (Smol 2009).

Thématiques de recherches développées et perspectives

L'éventail des questions potentiellement abordées par l'étude de ces archives lacustres est donc immense. Il a été synthétisé dans quelques ouvrages de référence (ex Cohen 2003, Smol 2008). Ma recherche personnelle ainsi que celle développée dans le cadre de collaborations et d'encadrement de travaux d'étudiants de master et thèses se sont articulées selon deux grands axes distincts et complémentaires :

Axe 1 : Reconstituer quantitativement l'histoire du climat -et plus particulièrement des températures estivales- au cours des 15 000 dernières années.

Il s'agit de prolonger rétrospectivement et à la meilleure résolution possible les données d'observation climatiques pour (1) mieux définir la complexité de la variabilité climatique et en comprendre les facteurs de forçages et (2) fournir un cadre climatique aux dynamiques environnementales naturelles et à l'anthropisation des écosystèmes. Cet axe de mes recherches a d'abord été développé dans le cadre de ma thèse. Il a été prolongé dans le cadre de la période post-doctorale et poursuivi depuis mon recrutement. Il repose principalement sur l'étude des assemblages sub-fossiles de Chironomidae et sur la quantification des températures estivales qui peut en être déduite en utilisant des fonctions de transfert. J'ai concentré mes travaux sur deux périodes clés de notre histoire climatique : le Tardiglaciaire et les deux mille dernières années, plus particulièrement dans le cadre de 2 projets ANR (Projets PYGMALION et GREENLAND). Cet axe de mes recherches fera l'objet du 1^{er} chapitre de ce mémoire.

Axe 2 : Reconstituer la trajectoire fonctionnelle des écosystèmes lacustres avec un focus particulier sur l'Anthropocène.

Par le truchement d'une approche combinant observation et retro-observation, il s'agit d'identifier les facteurs de perturbation et d'en déterminer les impacts (parfois en cascade) respectifs et/ou combinés sur le fonctionnement trophique des lacs avec une attention spéciale portée au cycle du carbone. J'ai commencé à développer ce second axe de mes recherches dans le cadre d'un post-doctorat au laboratoire EDYTEM, je l'ai poursuivi jusqu'à aujourd'hui notamment à travers l'encadrement des thèses de Victor Frossard (ANR IPER-RETRO) et de Simon Belle et la coordination de projets menés dans le cadre de dispositifs partenariaux (Zone Ateliers, OHM) avec les gestionnaires des milieux aquatiques (Agence de l'Eau, Suez Environnement, Reserve Nationale de Remoray, Parcs nationaux ...). Cet axe de mes recherches constitue l'objet du 2nd chapitre de ce mémoire.

Perspectives

Ces deux thématiques se rejoignent aujourd'hui et me permettent de proposer de nouvelles perspectives de recherches qui seront exposées dans le 3^{ème} chapitre de ce mémoire. Il s'agit de mettre à profit l'expertise acquise pour :

- Porter un regard critique sur le référentiel actuel, fondement ou « pierre de Rosette » des reconstitutions quantitatives à partir des communautés fossiles de Chironomidae. La proposition défendue sera l'utilisation d'un référentiel « sub-actuel », antérieur aux bouleversements écologiques majeurs engendrés par les activités humaines.
- Développer de nouveaux marqueurs paléoclimatiques indépendants (δO^{18} dans la chitine des Chironomidae)
- Identifier des sites d'étude où l'influence humaine est absente ou minime et qui se prêtent donc à la reconstitution des températures holocènes.
- Étendre les reconstitutions climatiques à l'intégralité du dernier cycle climatique en particulier par l'étude du site « phare » du Bergsee
- Poursuivre et favoriser le rapprochement entre paleo et neo-limnologie en limnologie théorique (cycle du carbone, interaction avec la biodiversité, fonction source/puit) et appliquée (diagnose écologique, dialogue et expertise auprès des gestionnaires).

Chapitre I : Changements climatiques, forçages et impacts environnementaux au cours des 15 000 dernières années.

I.A. Reconstituer le climat en cherchant la petite bête

I.A.1 Les Chironomidae et leurs restes subfossiles

Les Chironomidae sont une famille d'insectes très diversifiée de l'ordre des Diptères. Comme tous les insectes holométaboles, le développement de ces insectes passe par quatre grandes étapes : l'oeuf, la larve, la nymphe et l'imago (adulte) (Fig. 1). Les trois premières étapes s'effectuent pour la plupart des espèces en milieu aquatique comme les rivières, les lacs, les étangs et les mares temporaires. Au niveau mondial, on compte plus de 4 147 espèces de Chironomidae à larves aquatiques réparties parmi 339 genres (Ferrington 2008). Au terme de leur croissance qui passe par quatre stades successifs, les larves se métamorphosent sous forme nymphale (fig. 1).

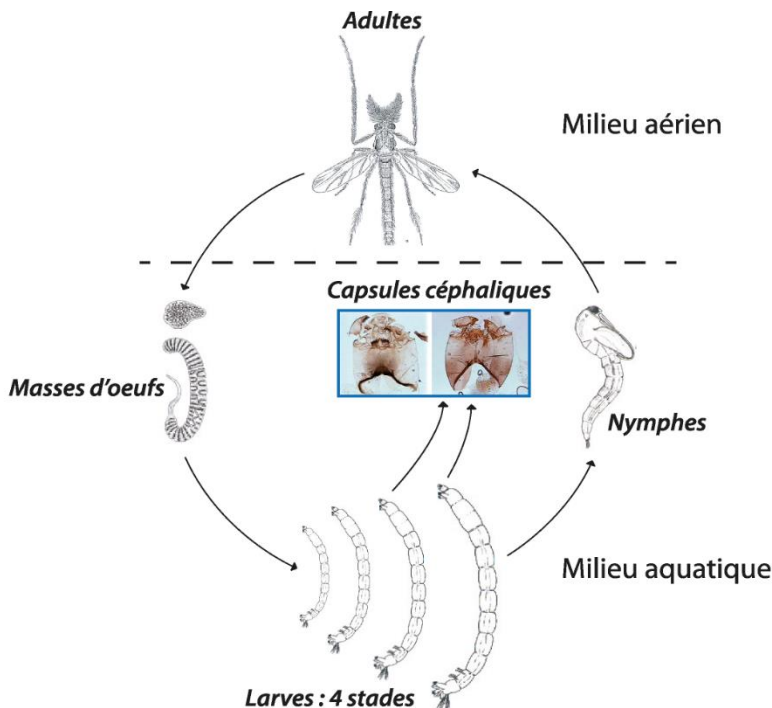


Figure 1 : Cycle de développement des Chironomidae et production de leur restes subfossiles : les capsules céphaliques.

Après la montée à la surface des nymphes mobiles, les imagos éclosent à l'air libre. Les formes adultes de la plupart des espèces ont une durée de vie assez réduite, leurs principales fonctions étant la reproduction et la dissémination. La durée du cycle de développement des Chironomidae est d'une année en moyenne mais dépend de l'espèce considérée et des conditions mésologiques. La phase larvaire des Chironomidae passe par 4 stades, ou instars, ponctués par la production d'exuvies (exosquelettes) dont les parties bien chitinisées correspondant à la tête (capsules céphaliques) sont conservées dans les sédiments lacustres (Fig. 1).

Les capsules céphaliques sont extraites du sédiment en suivant un protocole certes très simple mais assez coûteux en temps de main d'œuvre. Après un traitement chimique rapide (défloculation puis décarbonatation), les sédiments sont tamisés à 100 et 200 μm . Les capsules céphaliques de Chironomidae sont extraites une à une des refus de tamis en travaillant sous loupe binoculaire, puis montées entre lames et lamelles et identifiées au microscope. Les identifications, le plus souvent au niveau générique, sont fondées sur les caractéristiques morphologiques des capsules céphaliques (Fig. 2). Finalement, on peut faire correspondre à chaque échantillon un assemblage de Chironomidae défini par les abondances relatives des différents taxons ou calculer les flux (en nombre de capsules par m^2 et par an) des différents taxons si les données chronologiques et l'échantillonnage le permettent.

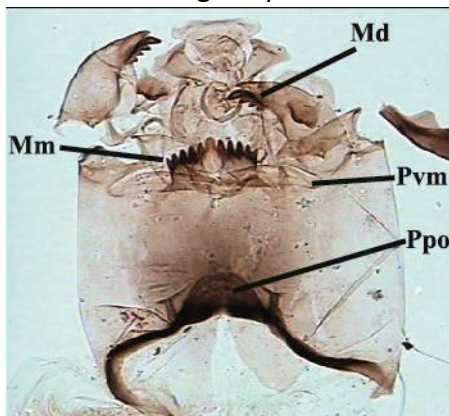


Figure 2 : Exemple de capsule céphalique de Chironomidae, la capsule (ici un spécimen du genre *Tanytarsus*) mesure environ 120 μm en largeur. Les identifications au genre sont réalisées d'après la morphologie des capsules d'après Wiederholm (1983), et Brooks et al. (2003). Md : Mandibules, Mm : Mentum, Pvm : Plaques ventro-mentales, Ppo : Plaques post-occipitales

1.A.2 Les Chironomidae, marqueurs climatiques

Les Chironomidae présentent plusieurs caractéristiques clés qui en font de bons intégrateurs des conditions limnologiques, environnementales et climatiques actuelles et passées:

- **L'abondance** : les Chironomidae sont les insectes les plus abondants et les plus largement répandus dans les eaux douces. Dans les archives sédimentaires, grâce à des concentrations élevées, l'étude des capsules céphaliques ne demande qu'une faible quantité de sédiment (en moyenne quelques grammes). Elle est donc parfaitement adaptée aux approches multiproxies et à haute résolution ou la quantité de matériel sédimentaire est limitée.
- **La diversité** : il existe un grand nombre d'espèces et de genres de Chironomidae avec des traits biologiques et écologiques très diversifiés. Les Chironomidae sont donc des insectes ubiquistes capables de se développer sous une grande variété de conditions limnologiques et climatiques, des lacs des régions tropicales jusqu'aux lacs arctiques et de haute altitude.
- **La vitesse de réponse** : la faible durée de leur cycle de développement (*ca* 1 an) alliée à la grande capacité de dispersion aérienne des adultes ailées confèrent aux Chironomidae une grande rapidité de réponse aux changements limnologiques et climatiques. Il est ainsi possible de rechercher et mettre en évidence une variabilité passée « haute fréquence » dans les archives sédimentaires.
- **Les principaux facteurs de contrôle** biotiques et abiotiques déterminant la composition des peuplements de Chironomidae sont assez bien connus : la ressource alimentaire (nature et quantité), les conditions physico-chimiques (oxygénation, pH, salinité), la nature de substrat, la température (de l'eau et de l'air), les relations inter-spécifiques (prédation, compétition)...

En 1991, Ian Walker et ses collaborateurs faisant suite à une première étude de Walker et Mathewes (1987) rompent avec l'interprétation conventionnelle des changements de composition des assemblages de Chironomidae dans les archives lacustres. Celle-ci était jusqu'alors généralement orientée vers les changements d'état trophique notamment dans la lignée des travaux de Saether (1979) ou de Wiederholm (BQI, 1981). Walker et al. (1991a) ont considéré la distribution des capsules céphaliques de Chironomidae dans un ensemble de lacs canadiens couvrant un large gradient latitudinal. Ils ont montré que la température de l'eau était, à large échelle géographique, un des facteurs principaux expliquant la répartition des Chironomidae parmi les lacs de leur étude. Ils ont défini pour chaque taxon un optimum et une tolérance vis-à-vis de la température et ont proposé la première fonction de transfert permettant d'inférer quantitativement les températures à partir de la composition des assemblages subfossiles. Walker et al. (1991b) ont mis en œuvre cette approche novatrice pour reconstituer quantitativement les températures tardiglaciaires dans l'Est du Canada et fournir une des premières preuves de l'existence du Dryas Récent en Amérique du nord.

Ces premiers travaux ont d'emblée suscité à la fois enthousiasme -l'approche a été rapidement répliquée dans d'autres contextes géographiques (ex Finlande : Olander et al. 1999, Alpes Suisses : Lotter et al. 1997 ...)- et controverses (Hann et al. 1992, Walker et al. 1992). Une des critiques principales était que l'approche proposée simplifiait implicitement à outrance la complexité des interactions entre les communautés de Chironomidae et les facteurs biotiques et abiotiques en ne tenant compte que d'une relation supposée directe entre le climat et les Chironomidae. Ainsi, les variations d'autres facteurs (oxygenation, relations interspécifiques, matière organique ...) ont pu engendrer des changements de communautés de Chironomidae au cours du temps et être traduits de façon erronée en variations de température par une fonction de transfert.

Finalement, Eggermont & Heiri (2011) dans leur excellent travail de synthèse sur les relations entre Chironomidae et température relèvent que :

- **Une relation entre la composition taxonomique des Chironomidae et la température** (de l'air ou de l'eau, annuelle ou estivale) est empiriquement mise en évidence dans la grande majorité des études considérant la distribution des Chironomidae parmi des lacs couvrant un large gradient climatique et ce, quelle que soit la région considérée (Europe, Amérique du Nord, Scandinavie, Islande Nouvelle Zélande, Tasmanie, Afrique de l'Est ...).
- Ces bases de données sur la distribution actuelle des Chironomidae permettent de déterminer **pour chaque taxon son optimum et sa tolérance** vis-à-vis de la température. Ces traits biologiques sont utilisés pour reconstituer quantitativement les températures passées à partir de la composition taxonomique des assemblages de Chironomidae.
- La relation entre la température et la composition des assemblages est complexe et met en jeu plusieurs mécanismes. **La température exerce une influence directe** sur le métabolisme et la physiologie des Chironomidae (ex structure, fonction et activité des enzymes et des processus enzymatiques, fréquence respiratoire, croissance et développement des différents stades, voltinisme ...) ainsi que sur leur comportement (émergence, reproduction ...). La relation apparente entre température et composition taxonomique des assemblages est aussi en partie -plus ou moins importante- la conséquence **des effets indirects en cascade de la température** sur les conditions mésologiques qui à leur tour influencent les communautés de Chironomidae (ex durée, force et profondeur de la stratification, influence sur les macrophytes littoraux, sur le développement des sols et de la végétation sur le bassin versant ..., fig. 3).

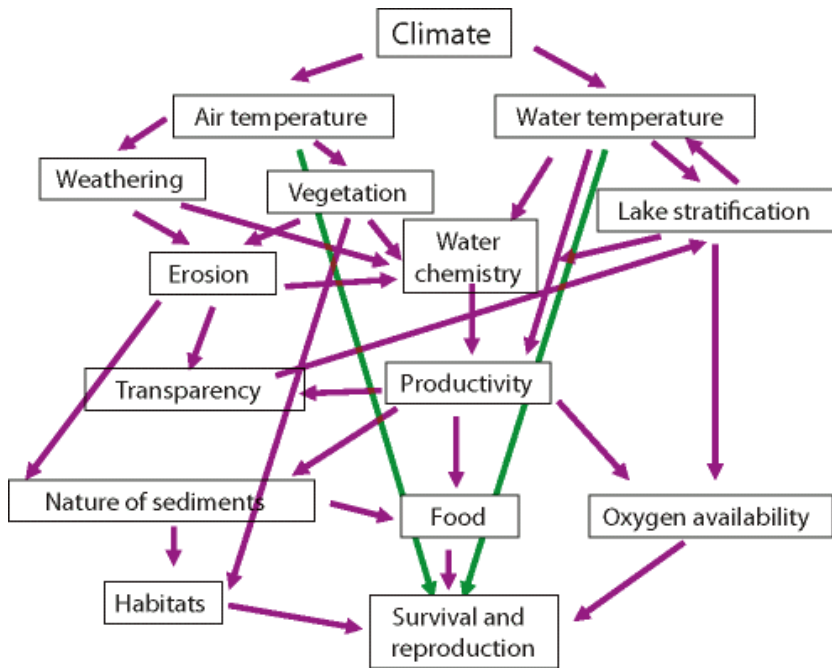


Figure 3 : représentation schématique des relations directes (en vert) et indirectes (en violet) entre le climat et les communautés de Chironomidae. D'après Eggermont et Heiri 2011.

Les assemblages de Chironomidae s'imposent donc aujourd'hui comme un marqueur climatique de premier plan. La plupart des grandes zones géographiques (Amérique du nord, Afrique ...) disposent aujourd'hui de fonctions de transfert « régionales » qui permettent d'inférer quantitativement les températures passées à partir de la composition des assemblages subfossiles. En Europe, la fonction de transfert développée par Oliver Heiri et Steeve Brooks (Heiri et al. 2011) est basée sur un référentiel actuel incluant plus de 300 lacs alpins et norvégiens, plus de 150 taxons de Chironomidae et couvre un large gradient climatique (température de juillet entre 3.5 et 18.4°C). **La reconstitution quantitative du climat à partir des Chironomidae n'est cependant pas si simple.** Des changements des conditions mésologiques se produisant de façon indépendante du climat entraînent évidemment des changements de composition taxonomique qui peuvent en première approche « mimer » ceux induits par des variations de température. Ces influences « confondantes » peuvent être détectées et contournées par la mise en œuvre d'une approche multi-proxies incluant l'étude d'indicateurs des conditions limnologiques et du bassin versant mais aussi des marqueurs climatiques indépendants. Par ailleurs, un choix de sites d'étude judicieux permet de minimiser les impacts potentiels de ces facteurs confondants.

I.B. Stratégie : choix des sites et des fenêtres chronologiques, approches multi-proxies

I.B.1 Maximiser l'influence du climat

Le choix des sites et/ou des périodes d'étude est primordial. Il est donc orienté afin de maximiser l'influence du climat (en particulier des températures estivales) sur les assemblages de Chironomidae et de minimiser l'influence des changements d'autres facteurs notamment ceux associés aux activités humaines.

Le Tardiglaciaire est *a priori* une période bien adaptée aux reconstitutions paléoclimatiques à partir des Chironomidae. En effet, en Europe, le Tardiglaciaire est marqué par une succession d'événements climatiques rapides et de fortes amplitudes ponctuant des tendances à plus long terme. Cette forte variabilité climatique est potentiellement le facteur de contrôle principal des changements des milieux terrestres et aquatiques, l'impact des activités humaines étant notamment négligeable.

Comparativement au Tardiglaciaire, l'Holocène est marqué en Europe par une dynamique plus subtile du climat avec des variations de plus faible amplitude des températures et des précipitations. De plus, cette variabilité climatique est caractérisée par une complexité d'ordre temporel avec l'expression de différentes fréquences imbriquées, et spatial avec l'existence de forts contrastes géographiques. Enfin, l'Holocène est marqué par l'empreinte grandissante de l'Homme sur son environnement, modifiant finalement de façon durable et globale le fonctionnement des écosystèmes. Ainsi, pour les reconstitutions des températures holocènes à partir des assemblages de Chironomidae subfossiles, les cibles d'étude les plus adaptées *a priori* sont donc les lacs soumis à des conditions climatiques actuelles limites pour de nombreuses espèces de Chironomidae et où les activités humaines et leurs impacts locaux sont limités. **J'ai donc choisi de privilégier les lacs de haute altitude et de haute latitude.**

1.B.2 D'une expertise disciplinaire forte à l'approche multiproxies

S'assurer que les changements taxonomiques mis en évidence dans les archives lacustres sont bien liés aux changements climatiques passés et comprendre au mieux les mécanismes d'une relation indirecte entre Chironomidae et température sont deux étapes cruciales de l'analyse critique des reconstitutions quantitatives. Elles occupent d'ailleurs une place majoritaire dans la section «discussion» des articles consacrés au sujet et justifient la pertinence des résultats et de leurs interprétations.

Il convient d'abord de s'appuyer sur l'importante littérature consacrée à l'écologie des Chironomidae où l'on trouve l'essentiel des traits d'histoire de vie des principales espèces et genres de Chironomidae. Il n'est pas possible ici d'en faire un inventaire, même incomplet. On pourra se référer à la base de données bibliographique issue du travail de Ernst Josef Fittkau, Friedrich Reiss et Odwin Hoffrichter (<http://literature.vm.ntnu.no/Chironomidae/>) et à l'ouvrage de référence « The Chironomidae, Biology and ecology of non-biting midges » édité par Armitage, P.D., Pinder, L. C. et Cranston, P chez Springer en 1995.

La pertinence des reconstitutions doit être ensuite évaluée à l'aune des résultats de l'étude d'autres marqueurs sédimentaires (ou proxies). La confrontation des changements stratigraphiques de composition des assemblages de Chironomidae avec la matière organique sédimentaire évaluée quantitativement (% de carbone organique et taux d'accumulation) et/ou qualitativement (ratio C/N) permet par exemple d'évaluer l'influence des changements de fonctionnement trophique (apports de matière organique allochtone, production phytoplanctonique, conditions d'oxygénation ...).

Enfin, la validation des reconstitutions produites doit s'appuyer sur la comparaison avec les résultats fournis par d'autres marqueurs indépendants (dendroclimatologie, reconstitutions issues des assemblages polliniques ...) et l'étude de sites voisins et, pour les périodes récentes, avec les données de suivis (longues séries météo).

Ce qu'il faut retenir

Les assemblages de Chironomidae sont aujourd'hui largement reconnus comme marqueurs climatiques de premier plan, particulièrement adaptés aux reconstitutions à haute résolution et à la quantification des changements climatiques dans une grande variété de contextes chronologiques et bio-géographiques.

La reconstitution des températures par l'application de fonctions de transfert n'est cependant pas un exercice trivial et exige une analyse paleoécologique critique des résultats à la lumière des connaissances des traits biologiques des taxa et des reconstitutions complémentaires fournies par une approche multi-proxies et multi-sites.

Afin de limiter les impacts possibles de facteurs indépendants du climat et d'éviter les biais induits dans les reconstitutions quantitatives, j'ai choisi de travailler d'abord sur Le Tardiglaciaire, période marquée par de fortes variations du climat et enregistrée dans un grand nombre d'archives lacustres. Pour l'Holocène, j'ai focalisé mes recherches sur les deux mille dernières années : pour cette période marquée par des variations plus subtiles des températures, la validation des reconstitutions est facilitée par l'existence de nombreux autres enregistrements climatiques indépendants (ex : fluctuations des glaciers, dendroclimatologie, longues séries de données ...). Pour cette période, j'ai ciblé les lacs a priori les plus épargnés par l'empreinte anthropique : les lacs d'altitude des Alpes et des Pyrénées ainsi que ceux des hautes latitudes (Groenland).

I.C La reconstitution des températures du Tardiglaciaire

Principales publications associées : [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [10], [11], [15], [20], [31], [32], [34], [36], [47].

I.C.1 Le Tardiglaciaire : définition et enjeux associés

Le Tardiglaciaire est la période de transition entre la dernière phase glaciaire et l'Holocène, l'interglaciaire actuel. La stratigraphie des isotopes de l'oxygène des carottes de glace du Groenland a révélé une importante variabilité climatique pendant cette courte période (Fig. 4). Sur la base de ces enregistrements, le groupe INTIMATE (Björk et al. 1998, Rasmussen et al. 2014) a proposé une stratigraphie événementielle pour le Tardiglaciaire (fig. 4).

Cette variabilité climatique du Tardiglaciaire constitue la résultante des changements dans les **facteurs de forçages** tels que la surface des calottes glaciaires, les concentrations atmosphériques en gaz à effets de serre et la circulation océanique (ex Heiri et al. 2014) qui sont présumés jouer un **rôle important sur le changement climatique en cours et à venir. Le Tardiglaciaire est donc une période « clé »** pour comprendre la réponse du climat à des variations dans ces facteurs de forçages et tester la pertinence des simulations issues des modèles de prédictions climatiques et donc celle des mécanismes de forçages pris en compte dans ces modèles. Atteindre cet objectif nécessite une reconstitution spatialisée et quantitative de la variabilité climatique du Tardiglaciaire.

Compte tenu de la forte variabilité climatique et environnementale qui le caractérise, le Tardiglaciaire est également une fenêtre chronologique particulièrement adaptée à l'étude des relations dynamiques entre climat et environnement.

Mes recherches s'inscrivent dans ce cadre général et en produisant des reconstitutions des températures estivales (moyenne de juillet) à partir des changements de composition des assemblages de Chironomidae dans des enregistrements sédimentaires lacustres, elles visent :

- aux échelles locale et régionales, à fournir **le contexte climatique** des changements de l'environnement et des sociétés,
- à l'échelle de l'Europe Occidentale, à **compléter le corpus de données** existantes encore largement lacunaire, tout particulièrement sur le territoire français.

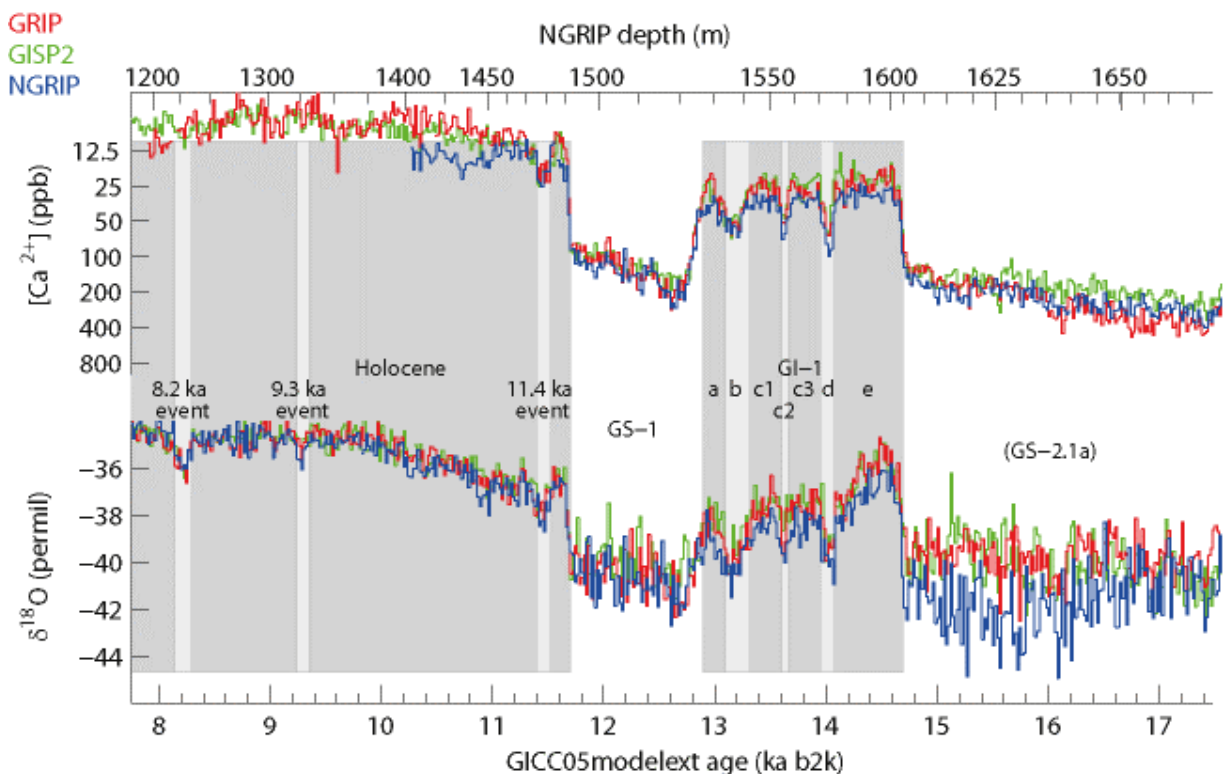


Figure 4 : Valeurs moyennes du $\delta^{18}O$ et des concentrations en Ca^{2+} des enregistrements du GRIP (rouge), du GISP2 (vert), et du NGRIP (bleu) selon la chronologie GICC05modelext, et stratigraphie événementielle INTIMATE (les phases froides sont en blanc, les phases chaudes en gris, les oscillations rapides froides sont en gris clair). Le Tardiglaciaire est caractérisé une succession d'événements climatiques majeurs : le Dryas Ancien (GS-2.1a), l'Interstade Tardiglaciaire (Bølling-Allerød, GI-1), le Dryas Récent (GS-1) et le début de l'Holocène. De plus, ces événements majeurs sont caractérisés par une variabilité climatique interne : des événements froids (GI-1d, GI-1b et GI-1c2) plus courts et de moindre amplitude ponctuent l'Interstade Tardiglaciaire qui est également marqué par une tendance longue au refroidissement, tandis qu'une bipartition du Dryas Récent (GS-1) a été plusieurs fois suggérée (ex : Lotter et al. 1992, Walker 1995, Isarin 1997).

Mes travaux ont pour l'instant porté sur l'étude de 5 séquences sédimentaires (fig. 5) intégrée à un réseau de sites européens.

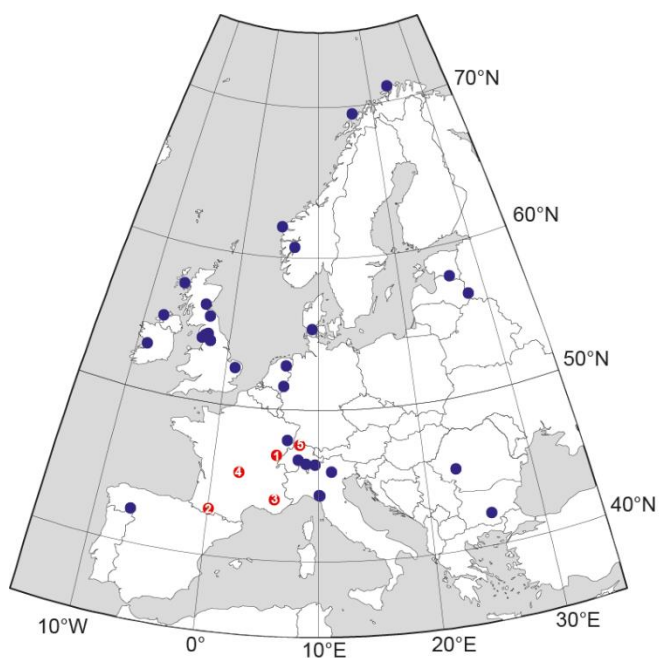


Figure 5 : Carte de localisation des reconstitutions quantitatives des températures en Europe.

Points bleus : reconstitutions publiées intégrées dans le projet Euclim (European climate change at the end of the last glaciation, coord.

O. Heiri and A.F. Lotter).

Points rouges : contribution personnelle au projet, sites dont l'étude est en cours ou achevée.

1 : Lac du Lautrey (Heiri & Millet, 2005),

2 : Ech (Millet et al., 2012)

3 : Lauza (non publié)

4 : Pignole et Lapsou (non publié)

5 : Bergsee (étude en cours)

I.C.2 Des données inédites sur les températures estivales Tardiglaciaires dans le Jura, les Pyrénées, les Alpes, et le Massif Central.

La reconstitution des températures d'après les assemblages de Chironomidae du Lac du Lautrey (Jura) a été produite en 2005 dans le cadre de mes travaux de Thèse (Heiri & Millet 2005). Cette courbe synthétisant à haute résolution l'évolution des températures estivales pendant le Tardiglaciaire dans le Jura a été une des premières publiées en Europe, et est vite devenu un enregistrement climatique de référence (85 citations, Scopus). La stratégie multi-proxies engagée de façon pionnière dans le projet Eclipse coordonné par M Magny nous a permis de proposer des reconstitutions croisées Chironomidae, pollen, niveaux de lacs (Peyron et al. 2005, Magny et al. 2006).

J'ai prolongé le travail mené dans le Jura par l'étude des assemblages de Chironomidae dans d'autres contextes géographiques où les reconstitutions paléoclimatiques quantitatives étaient encore absentes, rares ou lacunaires. Par exemple, au paleolac du Col d'Ech, l'analyse des Chironomidae dans 50 échantillons Tardiglaciaires et l'application de la fonction de transfert européenne (Heiri et al. 2011) ont permis de proposer la première reconstitution quantitative des paléotempératures pour les Pyrénées (Fig. 6, Millet et al. 2012).

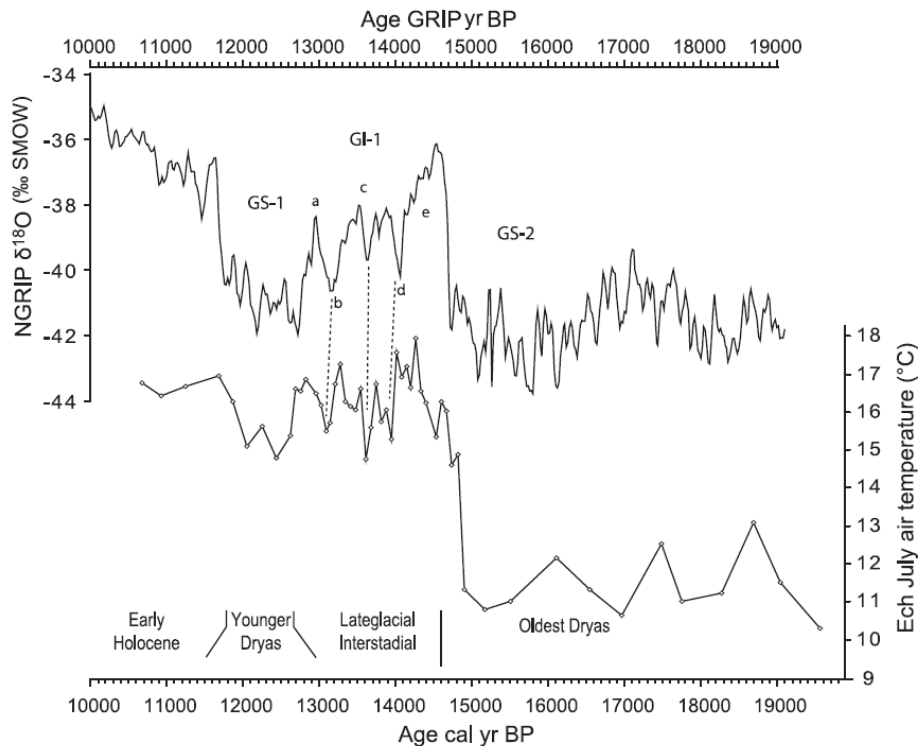


Figure 6 : Reconstitutions des températures Tardiglaciaires de l'air du mois de Juillet d'après les assemblages de Chironomidae du Col d'Ech comparées à la courbe du $\delta^{18}\text{O}$ du NGRIP (d'après Millet et al. 2012). Les températures de Juillet varient entre 10 et 13°C pendant le Dryas Ancien (GS-2). Le début de l'Interstade Tardiglaciaire (GI-1) est marqué par une augmentation des températures en deux étapes (16°C puis 17.5°C). L'Interstade est ensuite caractérisé par une diminution progressive des températures qui atteignent 16.5°C avant la transition avec le Dryas Récent. Pendant le Dryas récent (très compact), les températures baissent jusqu'à 15-15.5°C. Elles remontent aux environs de 17 °C au début de l'holocène. Pendant l'Interstade, deux courtes phases de refroidissement (environ -1.5°C) peuvent être –en première approche– corrélées respectivement aux GI-1d et GI-1b (Aegelsee Oscillation et Gerzensee Oscillation du Plateau Suisse, Lotter et 1992). Un troisième événement froid en position stratigraphique intermédiaire pourrait correspondre à une courte anomalie détectée dans l'enregistrement isotopique du GRIP (GI-1c2).

D'autres sites sont en cours d'étude, afin de compléter le maillage géographique des reconstitutions paleoclimatiques en France : l'enregistrement du paleolac du Lauza (fig. 7) situé dans le Champsaur (Hautes-Alpes), et les tourbières de Lapsou et de la Pignole situées en Auvergne.

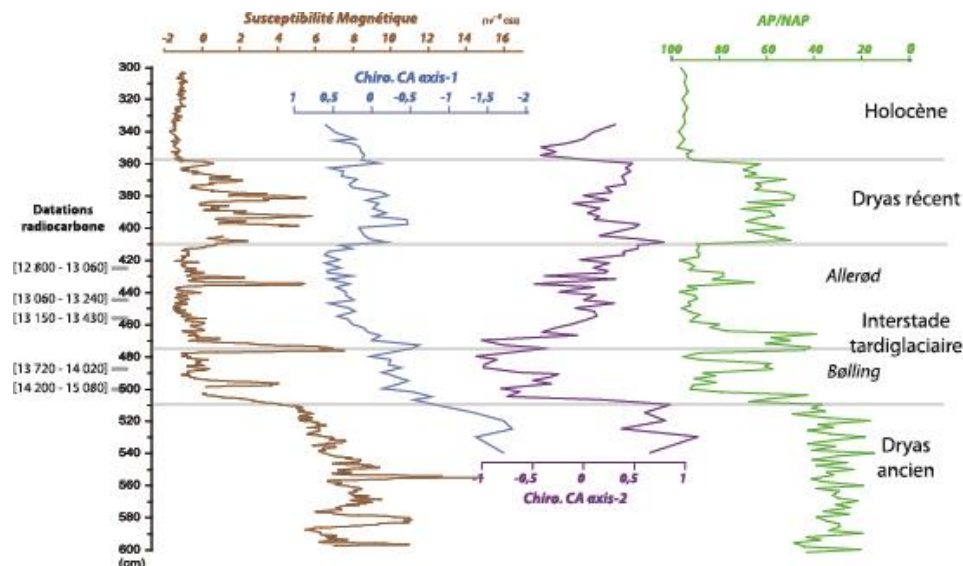


Figure 7 : L'enregistrement du paleolac du Lauza : susceptibilité magnétique, pollen (pourcentages AP/NAP, notez l'échelle inversée des pourcentages) et Chironomidae (scores des échantillons le long des axes 1 et 2 d'une AFC). L'analyse à haute résolution des cortèges polliniques et de la susceptibilité magnétique a démontré le caractère exceptionnel de l'enregistrement Tardiglaciaire de la séquence (analyses M. Court-Picon et G. Bossuet, Walter-Simmonet 2008). A la suite de ces travaux, j'ai réalisé l'étude des assemblages de Chironomidae à moyenne résolution (76 échantillons). Les résultats sont prometteurs : les assemblages de Chironomidae répondent sans équivoque aux changements climatiques du Tardiglaciaire. La prochaine étape, la reconstitution des températures, sera prochainement réalisée en collaboration avec Oliver Heiri.

1.C.3 Impacts du climat sur l'environnement

Les reconstitutions quantitatives des températures estivales inférées d'après les assemblages de Chironomidae contribuent à définir le cadre chrono-climatique des changements de l'environnement et des processus associés (érosion, feu ...).

Dans le piémont Pyrénéens (Col d'Ech et lac de Lourdes, Rius et al. 2014, fig.8), et au lac de Paladru dans l'Isère (Doyen et al. 2015), l'étude comparée de reconstitutions issues de marqueurs indépendants (Chironomidae, pollen, charbon de bois), a permis de discuter des influences respectives du climat, de la quantité et du type de biomasse végétale sur le signal incendie. Ces deux études ont montré que le signal incendie Tardiglaciaire répond de façon contrastée aux grandes phases climatique et qu'il peut donc être considéré comme un proxy climatique pertinent pour cette période. Cependant, la réponse du signal incendie aux changements des températures n'est pas linéaire. Elle apparaît plus ou moins modulée par la végétation (nature et biomasse) selon les périodes et les sites (Fig. 8).

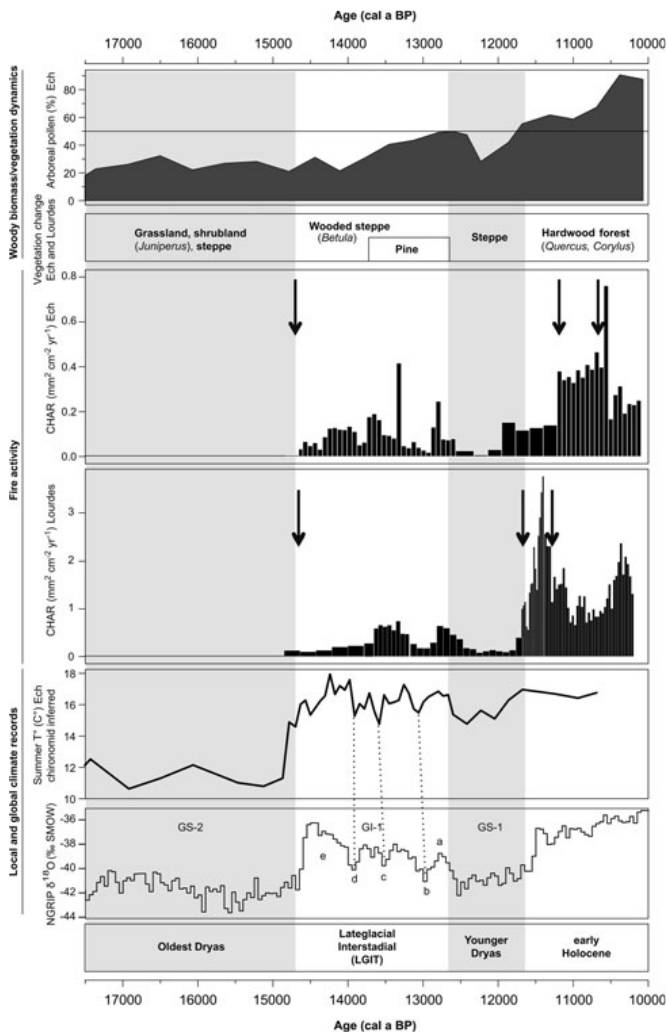


Figure 8 : Approches multiproxies et multi-sites menées sur les séquences Tardiglaciaires du Col d'Ech et du Lac de Lourdes (d'après Rius et al. 2012). L'histoire des feux reconstituée d'après les charbons de bois est comparée à la dynamique de végétation inférée d'après le contenu pollinique et aux changements du climat quantifiés d'après les assemblages de Chironomidae. Le climat est le facteur de contrôle principal des régimes de feux tandis que la végétation (type et quantité de biomasse) agit comme un facteur secondaire de modulation. Les phases froides (Dryas Ancien et Récent) sont caractérisées par une activité des feux négligeable ou très faible. Les phases chaudes (Interstade et début de l'Holocène) sont caractérisées par une augmentation de la fréquence des feux. Au début de l'Interstade, malgré des conditions climatiques favorables, l'activité des feux reste limitée par l'abondance de la biomasse végétale. Le début de l'Holocène marque le second tournant dans l'histoire des feux : l'augmentation importante des fréquences de feux est probablement provoquée par des conditions climatiques favorables (température et sécheresse estivales) et l'abondance de la biomasse végétale.

1.C.4 Gradients climatiques européens et facteurs de forçages

Dans le cadre d'une collaboration internationale (Projet EUCLIM), les reconstitutions quantitatives obtenues au Col d'Ech ont déjà été intégrées dans une base de données et ont participé à la reconstitution quantifiée des gradients de température à travers l'Europe pour les principales phases climatiques du Tardiglaciaire (carte fig. 5 et fig. 9, Heiri et al. 2014).

Dans la même étude, nous avons comparé l'amplitude des changements des températures estivales reconstituées par les proxies (assemblages de Chironomidae) avec celles prédites par un modèle de circulation général (ECHAM-4) pour les deux réchauffements majeurs du Tardiglaciaire (transitions Dryas Ancien-Bølling, et Dryas Récent-Préboréal, Fig 9).

L'excellente concordance mise en évidence entre les reconstitutions et les prédictions confirment que les modèles de circulation général (ici ECHAM-4) sont capables de prédire pertinemment les changements régionaux de température à travers l'Europe pour des périodes où les facteurs de forçages sont différents de la période actuelle. On peut donc supposer implicitement que les mécanismes de forçages pris en compte dans le modèle pour induire ces changements de températures sont pertinents.

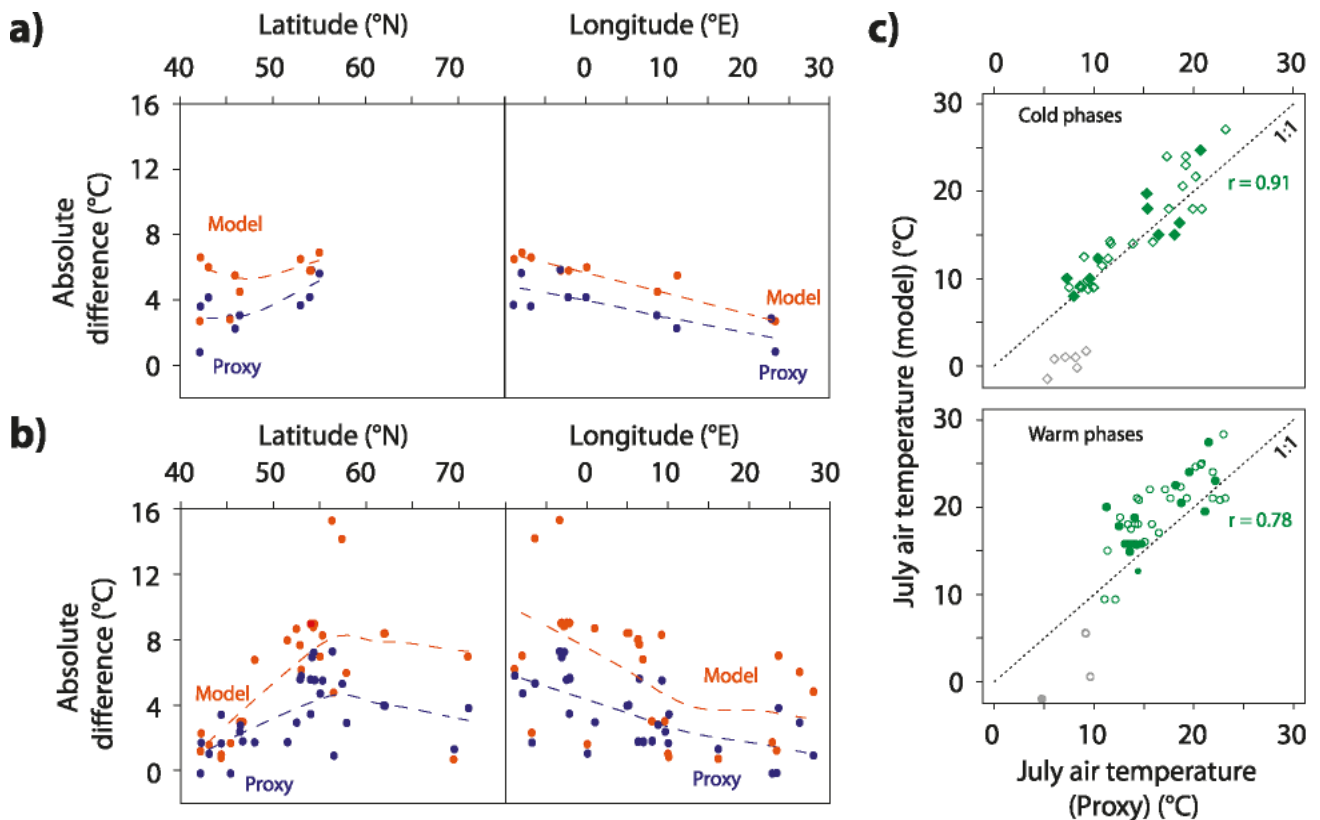


Figure 9 : Comparaison des reconstitutions des températures de juillet d'après les assemblages de Chironomidae avec les prédictions issues du modèle (ECHAM-4). a et b : variations longitudinales et latitudinales des changements de températures associées aux transitions GS-2/GI-1e (a) et GS-1/Holocène (b). (c) comparaisons directes des températures de juillet reconstituées avec celle issues du modèle pour les phases froides (GS-2 et GS-1) et les phases chaudes (GI-1 et début de l'Holocène). Ces comparaisons confirment que le modèle de circulation général (ici ECHAM-4) est capable de prédire correctement des changements de températures à travers l'Europe pour des périodes ou les mécanismes de forçages sont très différents de ceux connus actuellement. Cependant, ces comparaisons suggèrent une surestimation des températures d'été du Tardiglaciaire par ces modèles. Il est donc possible que ces modèles surestiment également le changement futur du climat associé aux variations de facteurs de forçages dominants pendant le Tardiglaciaire, comme la circulation nord-Atlantique et les concentrations de gaz à effet de serre.

Dans le modèle, le réchauffement correspondant aux deux transitions majeures du Tardiglaciaire est largement forcé par les changements de circulation océanique dans l'Atlantique Nord (AMOC) et les changements associés de la glace de mer.

L'influence des conditions Nord-Atlantiques sur les gradients européens se manifeste notamment par une augmentation de l'amplitude des réchauffements d'Est en Ouest du continent pour les transitions Dryas Ancien-Bølling (GS-2/GI-1e), et Dryas Récent-Préboréal (GS-1/Holocène, fig. 9). Ainsi, plus on s'approche de la façade Atlantique, plus les variations des conditions océaniques impriment leur influence sur les changements des températures locales.

Alors que pour des latitudes supérieures à 50°, les températures estivales sont équivalentes pour le Dryas Récent et le Dryas Ancien, elles sont plus froides au Dryas Ancien qu'au Dryas Récent en Europe méridionale et centrale. Cette différence s'explique probablement par une position plus méridionale du front polaire océanique pendant le Dryas Ancien.

Enfin, les évolutions des températures reconstituées pendant l'Interstade Tardiglaciaire suggèrent qu'à proximité de la façade Atlantique, l'intensification de la circulation océanique au début du

Bølling y a entraîné des températures plus chaudes qu'à la fin de l'Allerød (diminution des températures pendant l'interstade), alors que dans les zones plus continentales les températures pendant l'Interstade suivent la tendance à long terme de l'insolation estivale (augmentation des températures).

Ce qu'il faut retenir

J'ai étudié les assemblages de Chironomidae dans 5 enregistrements sédimentaires lacustres en France (4) et en Allemagne (1), deux sont publiés, les trois autres seront publiés prochainement.

La mise en œuvre de fonctions de transfert a permis de reconstituer quantitativement les variations locales de la température de juillet associées aux grands événements climatiques ainsi qu'à la variabilité de plus haute fréquence du Tardiglaciaire.

Ces reconstitutions fournissent le cadre climatique des changements de l'environnement : dynamique de végétation et évolution de la fréquence des feux.

Elles complètent le corpus de données disponible à travers l'Europe et contribuent aux reconstitutions spatialisées des changements du climat Tardiglaciaire qui offrent l'opportunité de développer des approches croisées proxy/modèles.

Le premier test montre la pertinence du modèle pour la reconstitution des patterns spatiaux de changement associés aux transitions majeurs du climat pendant le Tardiglaciaire. Il suggère en outre une surestimation probable des prédictions des changements climatiques futurs associés aux facteurs de forçage dominants pendant le Tardiglaciaire (circulation nord-atlantique, concentrations en gaz à effet de serre).

I.D Reconstitution du climat de l'Ère Commune

Principales publications associées : [13], [14], [19], [21], [29]

Les deux derniers millénaires ont été marqués par la succession d'une série d'oscillations climatiques dont la nature et l'amplitude sont encore mal connues pour de nombreuses régions : la «Dark Age Cold Period», le Petit Optimum Médiéval (POM), le Petit Age Glaciaire (PAG) et bien évidemment la phase de réchauffement actuel.

L'étude des assemblages de Chironomidae dans des enregistrements sélectionnés de hautes altitudes et latitudes a pour objectifs de mieux comprendre la contrainte climatique dans ces milieux «extrêmes» exploités et mis en valeur par l'Homme, de tenter de comprendre les ressorts de cette variabilité, de démêler ses forçages internes et/ou externes et enfin de mettre en perspective l'évolution actuelle du climat avec cette histoire récente.

I.D.1 Les Alpes du Nord : les enregistrements des lacs d'Anterne et des Cheserys

Dans les Alpes, les changements de températures de l'air du mois de juillet ont été reconstitués à partir des assemblages de Chironomidae de trois enregistrements sédimentaires (Fig. 10). La séquence du lac d'Anterne (Massif des Aiguilles Rouges) couvre les 1800 dernières années, les séquences des deux lacs des Cheserys (Chesersys 2 et 3) couvrent 800 et 1500 ans (Fig.11)

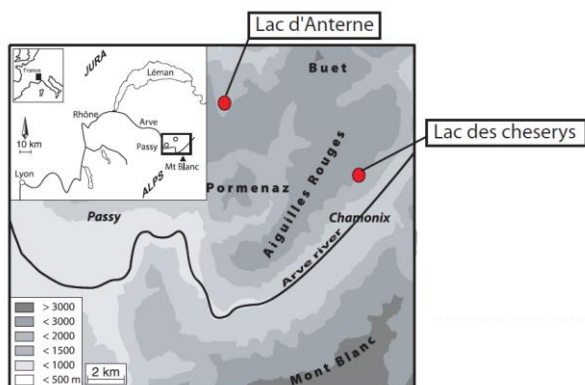


Figure 10 : Carte de localisation des 3 enregistrements sédimentaires (le lac d'Anterne et les deux lacs des Cheserys) où les températures de l'air de Juillet ont été reconstituées pour les 1800 dernières années à partir des assemblages de Chironomidae.

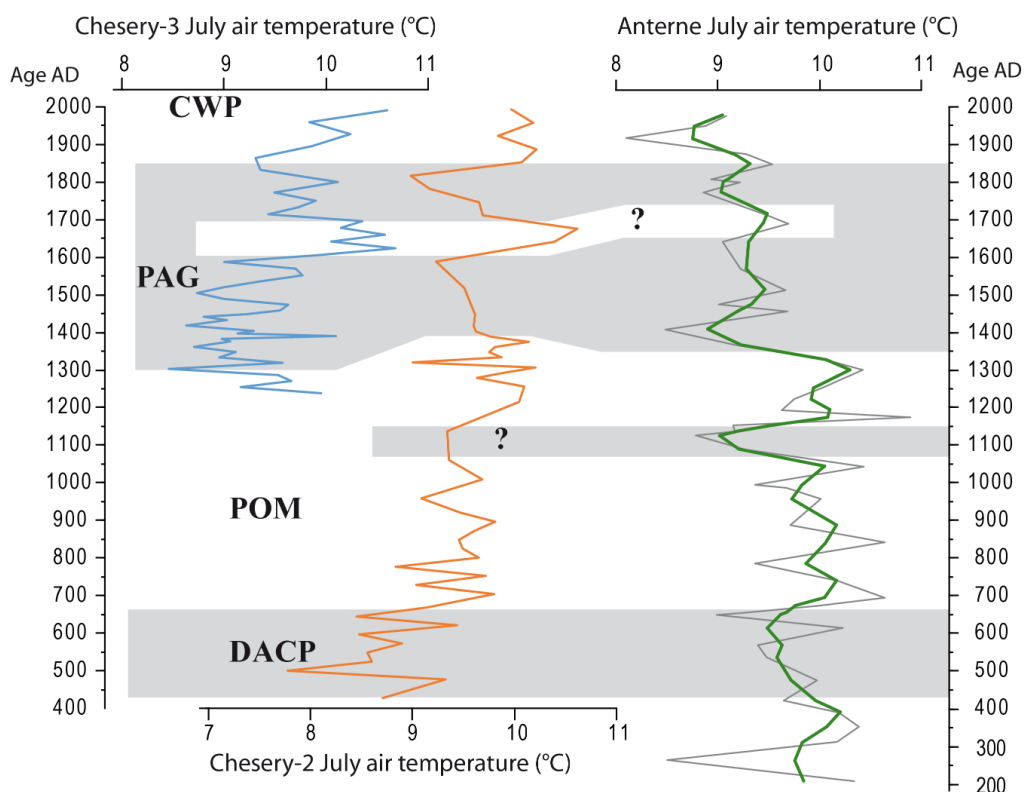


Figure 11 : Reconstitutions quantitatives des températures à partir des assemblages de Chironomidae des enregistrements du lac d'Anterne (Millet et al. 2009) et des deux lacs des Cheserys (article in prep).

Les résultats obtenus par l'étude de ces trois séquences sédimentaires des Alpes du Nord suggèrent:

- **Une succession d'événements climatiques à l'échelle pluriséculaire** entre 400 AD et aujourd'hui : deux phases froides (400-700 AD et 1350-1850) correspondant à la Dark Age Cold Phase (DACP) et au petit Age Glaciaire (PAG) et deux phases chaudes (700-1350 AD et 1850-aujourd'hui) correspondant à l'Optimum Climatique Médiéval et au réchauffement actuel.
- **Les amplitudes** des variations des températures associées à cette histoire climatique **sont faibles** (max 1.5 °C) et restent inférieures à l'erreur de prédiction de la fonction de transfert (RMSEP : 1.4 °C). De plus, comme c'est le cas à Anterne avec l'introduction du poisson au XXème siècle, des facteurs locaux, ont pu influencer le fonctionnement de ces lacs d'altitude et moduler ainsi la composition des assemblages de Chironomidae indépendamment du climat.
- La Chronologie des trois enregistrements reste flottante et doit être considérée avec prudence. Pour les deux lacs des Cheserys, elle repose sur des dates radiocarbone dont les grands intervalles

de calibration (plusieurs siècles pour certaines) combinés aux faibles taux de sédimentation rendent difficiles la datation précise des différentes phases climatiques. A Anterne, la chronologie repose principalement sur le décompte de lamines supposées annuelle et sur l'enregistrement de la pollution plombée.

- Cependant, **la bonne concordance (chronologie et valeurs) des reconstitutions obtenues** sur trois sites distincts de types différents (Cheserys vs Anterne) et datés de façon indépendante suggère la validité des résultats obtenus, même si elle doit encore être confirmée par l'étude de nouveaux sites. Cette validité est renforcée par la comparaison avec d'autres reconstitutions climatiques pour les Alpes et les régions limitrophes (Millet et al. 2009).
- A la résolution chronologique des reconstitutions des lacs de Cheserys, **l'augmentation récente des températures** dans le secteur d'étude **reste dans les limites de la variabilité climatique des 1500 dernières années** comme suggéré par des études dans d'autres zones des Alpes (ex Larocque et al. 2010).
- **Le forçage solaire semble prépondérant** sur la variabilité des températures estivales dans les Alpes du Nord au cours des 800 dernières années comme en témoigne l'étroite correspondance entre les températures reconstituées à Chesery_3 et l'irradiance solaire (fig. 12).

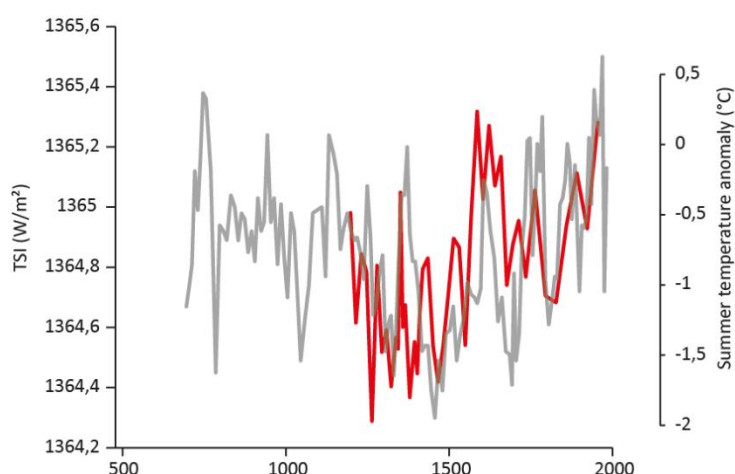


Figure 12 : comparaison des températures reconstituées au lac de Chesery_3 à partir des Chironomidae (en rouge) avec la courbe de l'irradiance (en gris, d'après Delaygue & Bard 2011).

1.D.2 Le Sud-Ouest du Groenland

Dans le cadre du projet «Greenland» coordonné par Valérie Masson-Delmotte et dans la continuité des études antérieures menées par le Laboratoire Chrono-Environnement (E. Gauthier, V. Bichet, H. Richard), j'ai analysé à haute résolution les assemblages de Chironomidae dans une séquence lacustre du sud-ouest du Groenland : le lac d'Igaliku. Ce petit lac situé près de la petite ville actuelle de Narsarsuaq, est au cœur de l'ancienne zone colonisée par les Vikings («Etablissements de l'Est»). Les objectifs de l'étude des changements de composition des communautés de Chironomidae au cours des 1500 dernières années étaient multiples :

- **comprendre les influences respectives des facteurs de contrôle** de cette dynamique : facteurs locaux dont l'anthropisation des milieux versus les facteurs globaux (changements climatiques).
- **reconstituer (si pertinent) un signal climatique** d'après les assemblages de Chironomidae et fournir ainsi un cadre climatique à la dynamique d'occupation et à l'évolution des pratiques.

Les assemblages de Chironomidae ont été analysés dans 104 échantillons prélevés de façon continue le long des 1500 ans que couvre la séquence. La confrontation des changements de composition des assemblages au cours des 130 dernières années avec les données de suivi montrent la prépondérance des températures estivales comme facteur de contrôle pour la période antérieure à 1980 (Fig. 13, Millet et al. 2014).

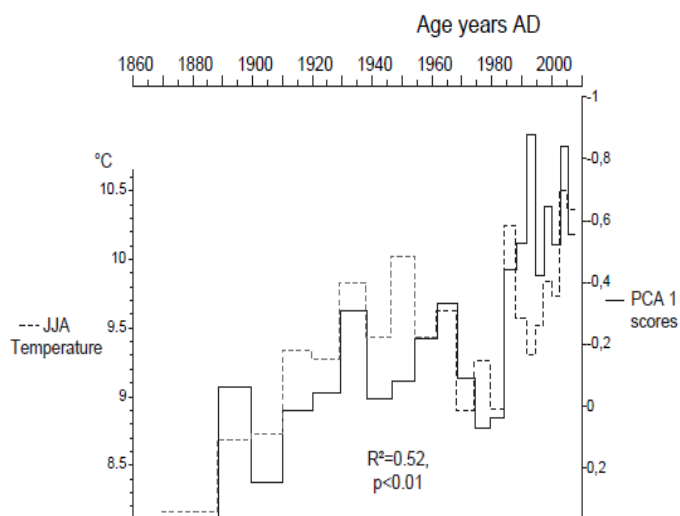


Figure 13 : trait plein : changements de composition des assemblages (scores des échantillons le long de l'axe 1 d'une ACP), trait pointillé : température moyenne de l'été (juin, juillet, août) enregistrée à la station météo d'Ivittuut (1873–1960) et de Narsarsuaq (1961–2006). Les températures sont représentées à la résolution chronologique des échantillons de Chironomidae. La bonne concordance entre les données températures et les changements taxonomiques montre la pertinence des assemblages de Chironomidae comme proxy climatique pour les périodes antérieures à 1980. A partir de cette date, l'eutrophisation anthropique du lac rompt cet équilibre.

Un signal climatique dérivé des Chironomidae pour les 1500 dernières années a donc été proposé pour la séquence. La pertinence de ce signal est validée par son adéquation avec la courbe climatique synthétique pour la zone arctique proposée par Kaufman et al. en 2009 (Fig. 14).

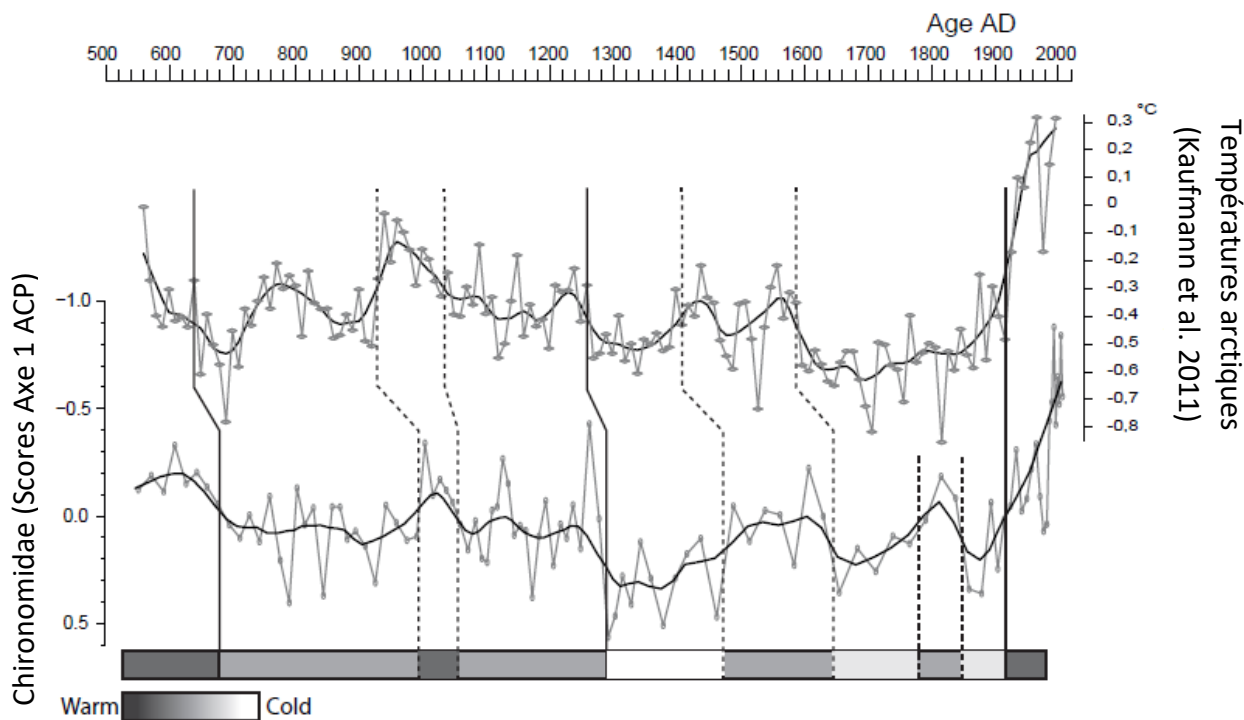


Figure 14 : Scores des échantillons de Chironomidae le long de l'axe 1 d'une ACP comparée à la reconstitution des températures arctiques proposée par Kaufman et al. (2009). Les traits verticaux indiquent les changements climatiques majeurs (lignes pleines) et mineurs (lignes pointillées) indiqués par les Chironomidae. A l'instar de Kaufman et al. (2009), les Chironomidae suggèrent une tendance longue à la baisse, interrompue au 20^{ème} siècle. Les changements de composition taxonomiques suggèrent une phase plus froide entre 1280 et 1900 correspondant au Petit Age Glaciaire.

Les assemblages de Chironomidae de la séquence d'Igaliku fournissent le premier signal climatique obtenu au cœur de la zone de colonisation viking (Millet et al. 2014). Ils procurent ainsi un cadre climatique à la dynamique d'occupation et à l'évolution des pratiques. Ce signal a ainsi par exemple été comparé avec l'évolution du régime alimentaire perçu par les analyses isotopiques des ossements des sépultures vikings (Fig. 15). On constate une coïncidence remarquable entre le refroidissement vers 1280 AD et une bascule vers une ressource alimentaire majoritairement d'origine marine. La contrainte climatique a probablement limité la production de ressources terrestres (élevage), les populations vikings se sont adaptées en se tournant vers la ressource marine.

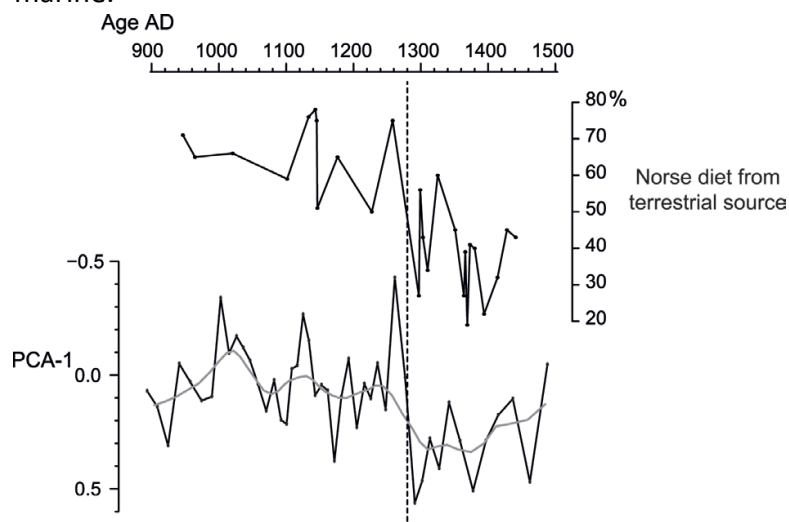


Figure 15 : Scores des échantillons de Chironomidae le long de l'axe 1 d'une ACP pour la période 900-1500 et proportion relative de la ressource terrestre dans l'alimentation des vikings déterminée d'après l'analyse des isotopes stables du carbone dans les restes osseux issus de sépultures (Arneborg et al.1999)

Ce qu'il faut retenir

Les assemblages de Chironomidae de trois séquences lacustres des Alpes du Nord m'ont permis de reconstituer avec succès les changements de températures estivales au cours des 1800 dernières années et ce malgré la complexité associée à cette période (chronologie imprécise, variations de températures inférées dans la marge d'erreur des fonctions de transfert, et impacts anthropiques confondants). Dans ce contexte, la stratégie multi-sites a été payante, puisqu'elle permet de faire émerger un signal commun, climatique, partagé par les différents enregistrements. Ces reconstitutions indiquent une succession d'événements climatiques (DACP, POM, PAG, réchauffement récent), précisent leurs bornes chronologiques et quantifient les amplitudes des changements de températures associés.

Dans le Sud-Ouest de Groenland, un signal climatique –non quantifié faute de fonction de transfert adaptée- a été déduit des assemblages de Chironomidae de la séquence d'Igaliku. Cette première reconstitution à haute résolution dépeint les changements climatiques des 1500 dernières années et fourni pour la première fois le contexte climatique local de l'histoire de la colonisation viking (Etablissement de l'Est).

Dans ces deux zones géographiques, les impacts anthropiques du dernier siècle (introduction de poissons à Anterne, eutrophisation à Igaliku) dépassent largement ceux du changement climatique. C'est sur cette thématique que porte le 2nd axe de mes recherches.

Chapitre II : Impacts de l'homme sur le fonctionnement trophique des écosystèmes lacustres

Aujourd'hui, comme en témoignent par exemple les études diagnostiques réalisées dans le cadre de réseaux de suivis nationaux, de nombreux lacs sont profondément altérés dans leur fonctionnement, avec comme résultante une perte souvent dramatique de biodiversité, la modification des fonctions source/puit de carbone, mais aussi la remise en cause des services rendus par ces hydrosystèmes (pêche, tourisme, alimentation en eau potable ...). Le maintien et/ou la restauration durable des services de soutien, de régulation et culturels associés à ces écosystèmes sont donc devenus des objectifs majeurs dans le contexte du changement global en cours et à venir. Répondre à ces enjeux sociétaux nécessite une connaissance approfondie des facteurs et des mécanismes de forçages, et une caractérisation des réponses fonctionnelles des systèmes.

En développant une approche paléolimnologique, mes recherches s'inscrivent dans ce cadre général avec comme objectifs principaux :

- **Reconstituer la trajectoire écologique des lacs.** Dans ce volet, l'état écologique est reconstitué de façon diachronique par l'étude de descripteurs intégrateurs du fonctionnement trophique à l'échelle de l'ensemble du système : les assemblages de Chironomidae de la zone profonde, les signatures isotopiques du carbone dans la chitine des Chironomidae (consommateurs benthiques) complétés par l'étude quantitative et qualitative de la matière organique sédimentaire (Corg, C/N, $\delta^{13}C$). Il s'agit ensuite de confronter ces dynamiques aux reconstitutions diachroniques des facteurs potentiels de forçage pour répondre aux questions :
 - o Quels sont les états d'équilibre initiaux, pre-perturbation ?
 - o Y a-t-il eu des changements significatifs de fonctionnement trophique ? Selon quelles temporalités et amplitudes ?
 - o Quels sont les facteurs de perturbations en jeu dans ces bascules fonctionnelles et quelles sont leurs importances respectives ?
 - o Quelle modèle de trajectoire est suivi par le lac (linéaire, « tipping point », « regime shift »), et la question corollaire : ces évolutions sont-elles réversibles ?

- **Evaluer les conséquences de ces changements de fonctionnement sur le cycle du carbone** et en particulier sur le transfert du carbone du méthane dans les réseaux trophiques benthiques (**méthanotrophie**). L'enjeu de ces recherches est de montrer comment des facteurs de perturbations d'échelle locale (occupations des sols et pratiques agropastorales) peuvent induire ou favoriser le métabolisme du méthane dans les systèmes lacustres avec des effets potentiels à une échelle globale puisque le méthane est un puissant gaz à effet de serre.

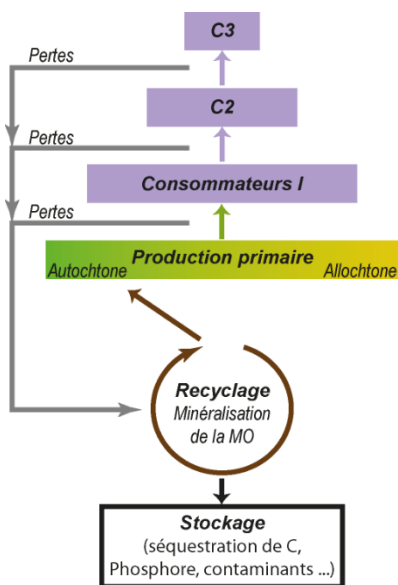
Ces recherches répondent donc évidemment à des **enjeux de recherches fondamentales**. Par la mise en évidence de bascules majeures dans le fonctionnement des lacs, leur datation, l'identification de leurs facteurs naturels et/ou anthropiques de contrôle et l'évaluation de leurs conséquences notamment sur le cycle du carbone. Elles apportent finalement des éléments originaux à la problématique actuelle de l'Anthropocène.

Elles concourent également à répondre à des **enjeux de recherches plus appliquées** tournées vers la gestion durable des écosystèmes. Une partie d'entre elles a d'ailleurs été menée dans le cadre de projets partenariaux avec les gestionnaires des milieux aquatiques (ex : Agence de l'Eau Rhin Meuse pour Longemer et Gerardmer) et d'espaces protégés (ex : RNN du Lac de Remoray).

II.A Concepts et méthodes

Mes travaux, se sont focalisés sur la reconstitution diachronique des mécanismes de **recyclage et de stockage de la matière organique**, considéré comme des **intégrateurs du fonctionnement trophique** à l'échelle de l'ensemble du système lacustre.

II.A.1 Le fonctionnement trophique des lacs et les impacts anthropiques



De façon très schématique, le fonctionnement trophique d'un lac met en jeu 4 mécanismes principaux (fig. 16) : 1) la production primaire autotrophe qui peut être autochtone et/ou allochtone, elle est assurée par des organismes phototrophes (algues, plantes vasculaires) et/ou chimiotrophes (ex archées méthanogènes), 2) le transfert de la matière et de l'énergie dans un réseau trophique plus ou moins complexe, 3) le recyclage (minéralisation) de la matière organique non transférée par des organismes hétérotrophes 4) le stockage de la matière non recyclée dans le compartiment sédimentaire.

Figure 16 : Représentation schématique des 4 mécanismes principaux du fonctionnement trophique d'un lac : la production, le transfert au consommateur, le recyclage et le stockage.

L'équilibre dynamique entre ces 4 mécanismes est initialement contrôlé par des caractéristiques typologiques des systèmes. Parmi ces nombreux facteurs potentiels « naturels », on peut citer par exemple le substratum géologique et la pédologie qui influent sur la minéralisation des eaux et donc sur la disponibilité en nutriments et minéraux essentiels à la production primaire et secondaire, le climat et la morphologie de la cuvette qui déterminent en grande partie le fonctionnement thermique du lac (fréquence des brassages : lacs mono- di- ou polymictiques et l'efficacité des brassages : lacs méromictiques) et impactent les conditions physico-chimiques dans la zone profonde, et l'occupation des sols du bassin-versant qui module la quantité et la qualité des apports allochtones en matière organique.

L'action de l'homme modifie -potentiellement- **ces équilibres naturels** depuis la révolution Néolithique et la mise en place des paysages agro-pastoraux et le développement des usages et pratiques associées, jusqu'aux impacts sans précédent en amplitude, diversité et échelle d'action marquant la période contemporaine. Parmi la diversité des perturbations d'origine anthropique, les plus fréquemment rencontrées sont :

- **L'eutrophisation** des masses d'eaux (effet bottom-up) : les apports anthropiques de nutriments entraînent une sur-production primaire et un changement des communautés de producteurs ; ils entraînent donc un déséquilibre trophique à l'échelle du système.
- **L'introduction et le maintien de nouvelles espèces** (effet top-down) : L'introduction de nouvelles espèces et le maintien actif de leur population modifient durablement la structure des réseaux trophiques et donc les transferts associés.
- **Les apports de contaminants toxiques** qui pour certains inhibent ou modifient les mécanismes de transfert, de production et de recyclage.
- **Le changement climatique** : les systèmes lacustres présentent une forte sensibilité aux changements climatiques qui peuvent exercer une influence directe ou indirecte sur un grand nombre de processus impliqués dans le fonctionnement trophique lacustres.

Les actions souvent combinées de ces différents facteurs de perturbation d'origine anthropique conduisent à une **altération de l'efficacité des transferts dans les réseaux trophiques** et à une augmentation des flux de matière organique résiduelle vers la zone profonde avec comme résultantes une **augmentation des processus hétérotrophes** de dégradation de la matière organique, **une dégradation des conditions d'oxygénation** et **une accumulation de MO dans le compartiment sédimentaire**. Ces nouvelles conditions sont potentiellement propices à **l'apparition et au développement du métabolisme du méthane** (production, transfert émission).

II.A.2 Les marqueurs étudiés

La reconstitution des trajectoires des lacs s'appuie d'abord sur des descripteurs intégrateurs du fonctionnement trophique des lacs : les assemblages de Chironomidae de la zone profonde et la signature isotopique du carbone de la chitine et de la MO. Il s'agit ensuite de cerner les facteurs de forçages en intégrant ces reconstitutions parfois complétées par des marqueurs spécifiques (ex ADN dégradé de bactéries méthanotrophes) à des approches multiproxies combinant l'étude d'indicateurs des conditions environnementales et des activités anthropiques locales.

▪ **Les assemblages de Chironomidae** : intégrateurs des **conditions d'oxygénation** hypolimnétiques

Pour les Chironomidae, comme pour tous les organismes hétérotrophes à métabolisme aérobie, l'oxygène est le comburant indispensable de la production énergétique. La **concentration en oxygène dissous** est reconnue de manière consensuelle comme **un des facteurs dont l'action sur les larves de Chironomidae est primordiale** (Brundin 1949, Rieradevall & Prat 1991, Verneaux & Aleya 1998, Heinis & Davids 1993, Int Paris et al. 1996, Quinlan et al. 1998). Quelques travaux ont examiné en conditions contrôlées et dans le milieu naturel les tolérances de différents taxons vis-à-vis des faibles concentrations en oxygène (Heinis & Crommentuijn 1992, Brodersen et al. 2004, 2008). Finalement, les taxa peuvent être classés selon leur *preferendum* et leur tolérance vis à vis de la concentration en oxygène et de ses variations (ex Quinlan et al. 1988, Brodersen et al. 2008). Certains taxa, sténo-polyoxybiontes exigent des concentrations élevées en oxygène dissous et ne supportent que de faibles variations de ce paramètre. A l'opposé, d'autres taxons euryoxybiontes sont capables de se développer dans des conditions fortement hypoxiques. Cette capacité est conférée par certaines spécificités physiologiques (présence de protéine transporteur d'oxygène du type Hémoglobine) et éthologiques (allongement des tubes, ventilation et dormance).

Ainsi, la **composition** des communautés larvaires de la zone profonde des lacs stratifiés est en **équilibre et reflète donc les conditions d'oxygénation** qui y règnent et qui résultent pour une grande partie du fonctionnement trophique et de l'efficacité des transferts trophiques.

La reconstitution des conditions d'oxygénation hypolimnétiques d'après la composition des assemblages fossiles de Chironomidae collectés dans la zone profonde des lacs stratifiés doit tenir compte de l'origine des restes subfossiles (profonde versus littorale). Dans les lacs stratifiés, plusieurs études ont montré que la distribution bathymétrique des restes fossiles de Chironomidae reflètent fidèlement celle des communautés larvaires (vivantes) de Chironomidae (ex Iovino 1975; Brodin 1986). Ces études montrent que la majorité des capsules céphaliques produites dans la zone littorale et secondairement remises en suspension semblent se déposer préférentiellement dans les sédiments à la profondeur de la thermocline. Cependant, d'autres travaux ont montré une influence potentiellement significative des phénomènes de re-déposition des capsules céphaliques d'origine littorale sur la composition des assemblages échantillonnés dans la zone profonde (Kansanen 1985; Schmäh 1993). Ainsi par exemple, la prévalence de conditions d'oxygénation trop contraignantes (anoxie) entraîne une disparition des populations de Chironomidae de la zone profonde (zone morte ou « dead zone »). Les assemblages subfossiles sont alors dominés par des taxa littoraux dont les pourcentages des restes fossiles dans les assemblages augmentent donc mathématiquement. Finalement, la reconstitution de la composition des de la dynamique des communautés de la zone profonde et des conditions d'oxygénation associées doit donc s'appuyer sur les traits biologiques connus pour les différents taxa retrouvés (habitats préférentiels, distribution bathymétrique, régime alimentaire ...).

▪ **La signature isotopique du carbone** : outils de compréhension du **fonctionnement trophique**

Le carbone présente deux isotopes naturels stables, le carbone 12 (^{12}C) et le carbone 13 (^{13}C) qui représentent respectivement 98,89% et 1,11 % du carbone total de la biogéosphère. Le ratio de ces deux isotopes stables dans un échantillon est exprimé sous la forme d'une valeur delta (δ). Cette valeur correspond à la différence entre le ratio isotopique dans l'échantillon et celui d'un standard international (belemnite de Pee Dee), exprimée en pour mille (‰) de la valeur du ratio dans le standard. Le $\delta^{13}\text{C}$ d'un échantillon est donc calculé selon la formule :

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standard}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standard}}} \times 1000 = \left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

Plus la valeur du $\delta^{13}\text{C}$ est faible, plus l'échantillon mesuré est appauvri en ^{13}C par rapport au ^{12}C , relativement au ratio du standard.

L'analyse des isotopes stables (AIS) du carbone est une approche aujourd'hui **largement exploitée en écologie trophique**. En effet, dans les années 1970, des études réalisées sur le terrain (ex Haines, 1976) ou en conditions contrôlées (DeNiro et Epstein, 1978) ont montré que **la signature isotopique en carbone d'un consommateur ($\delta^{13}\text{C}$) est très proche et reflète donc celle de leur nourriture**. En d'autres termes, le fractionnement isotopique du carbone au cours d'une transition trophique est faible : DeNiro et Epstein (1978) en travaillant sur 13 espèces de consommateurs ont estimé un fractionnement trophique $\Delta^{13}\text{C}_{\text{consommateur-nourriture}} (= \delta^{13}\text{C}_{\text{consommateur}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{nourriture}})$ à 0,8‰ +/- 1,1‰ en considérant le corps entier des consommateurs. Pour les Chironomidae, l'expérimentation de

Frossard et al. (2013) menée sur un élevage en conditions contrôlées de *Chironomus riparius* et testant 3 ressources alimentaires a montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre la signature isotopique de la nourriture et celle des larves des 3eme et 4eme stades larvaires ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{consommateur-nourriture}} = 0\text{‰}$). Finalement, **la signature $\delta^{13}\text{C}$ d'un consommateur constitue la résultante de la proportion des différentes ressources potentielles qui compose son régime alimentaire**. Le régime alimentaire d'un consommateur peut être donc être déterminé en deux étapes (1) l'estimation du $\delta^{13}\text{C}$ moyen de la nourriture par la mesure du $\delta^{13}\text{C}$ consommateur et (2) la détermination des proportions relatives des différentes sources potentielles de nourriture dont on connaît les $\delta^{13}\text{C}$ pour obtenir le $\delta^{13}\text{C}$ moyen estimé dans l'étape 1 (DeNiro et Epstein, 1978).

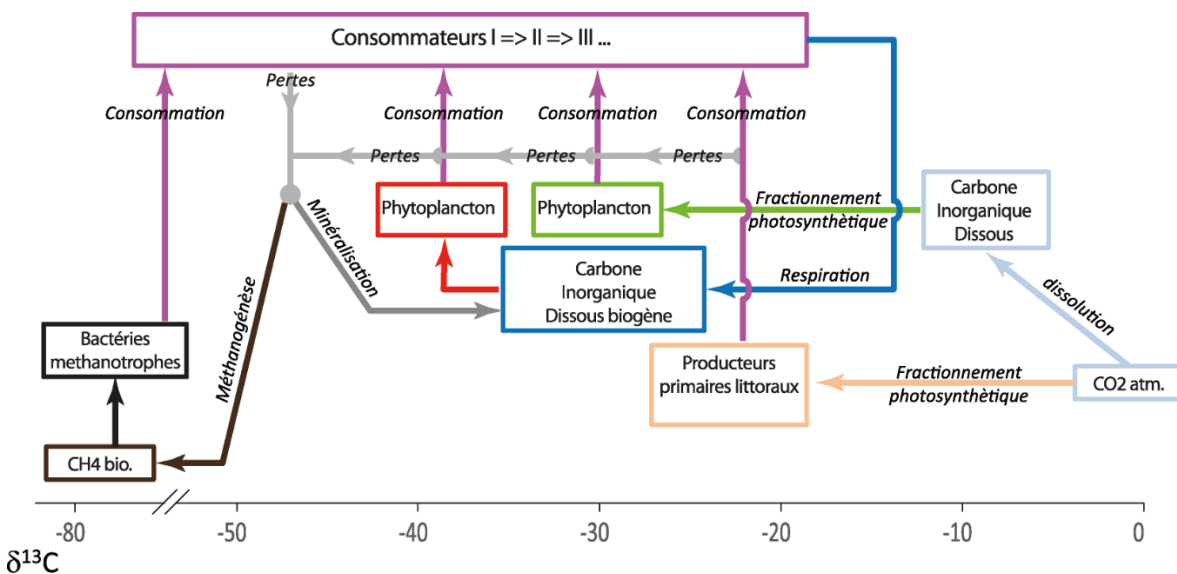


Figure 17 : Signatures isotopiques des différentes sources de carbone transférées dans les réseaux trophiques lacustres jusqu'aux consommateurs et signatures résultantes des consommateurs. Etant donné le caractère conservatif de la signature isotopique du carbone le long de la chaîne trophique, le $\delta^{13}\text{C}$ mesuré dans la biomasse des consommateurs et ses variations temporelles et/ou spatiales sont de bons indicateurs du fonctionnement trophique des lacs. Ils permettent d'évaluer les proportions respectives du carbone terrestre et/ou aquatique transféré dans les réseaux trophiques, l'importance de l'hétérotrophie (respiration, minéralisation), et le développement de voies métaboliques particulières comme la méthanogénèse et la méthanotrophie.

Le transfert conservatif de la signature isotopique dans l'édifice trophique permet donc, à partir de variations dans l'espace ou le temps de la signature isotopique des consommateurs et des producteurs, d'estimer **les changements de contribution des différentes sources de carbone de base assimilées par les producteurs primaires chimio et/ou phototrophes et transférées dans l'édifice trophique** (Fig. 17) : carbone inorganique d'origine atmosphérique, carbone inorganique biogénique (respiré, minéralisé), carbone organique (méthane).

Ainsi l'analyse des isotopes stable du carbone dans des groupes taxonomiques avec des niches écologiques différentes contribue à comprendre **le fonctionnement trophique des lacs en précisant les sources et voies de transfert du carbone dans le système**. Elle permet d'évaluer les proportions respectives du carbone terrestre et/ou aquatique transféré dans les réseaux trophiques

(autochtonie vs allochtonie), l'importance de l'hétérotrophie (respiration, minéralisation), et le développement de voies métaboliques particulières comme la méthanogénèse (recyclage du carbone en condition anoxique) et la méthanotrophie (transfert du carbone du méthane dans les réseaux trophiques).

DeNiro et Epstein ont dès 1978 montré la **pertinence de l'analyse des isotopes stables du carbone sur des restes subfossiles** pour la reconstitution des régimes alimentaires passés. Heiri et al. (2012), à partir d'une synthèse rapide de résultats d'expérimentations non publiées ont suggéré que les $\delta^{13}\text{C}$ des capsules céphaliques de Chironomidae étaient très similaires à la signature isotopique des larves, avec un faible offset ($\delta^{13}\text{C}_{\text{larves}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{capsules}}$). **L'expérimentation menée au laboratoire Chrono-Environnement** a finalement confirmé que dans les conditions expérimentales (1 espèce de Chironomidae, 3 sources de nourriture différentes) **l'offset ($\delta^{13}\text{C}_{\text{larves}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{capsules}}$) est de 1%** (Frossard et al. 2013).

Plusieurs travaux ont donc exploité les changements de la signature isotopique du carbone de la chitine des Chironomidae pour reconstituer les changements affectant le cycle du carbone avec un focus particulier sur la méthanotrophie dans les lacs d'Alaska (Wooller et al. 2012), de Sibérie (van Hardenbroek et al. 2013) et de Hollande (Schilder et al. 2017).

Ce qu'il faut retenir

Dans cet axe de mes recherches, la reconstitution des trajectoires fonctionnelles des systèmes lacustres s'appuie sur l'étude :

- *d'indicateurs intégrateurs du fonctionnement trophique : (i) les assemblages de Chironomidae de la zone profonde comme marqueurs des conditions d'oxygénation et (ii) des signatures isotopiques du carbone de la matière organique sédimentaire et de la chitine des Chironomidae comme marqueurs des sources et voies de transfert du carbone dans les réseaux trophiques.*
- *d'un ensemble de marqueurs et d'enregistrements des changements environnementaux et climatiques.*

II.B Equilibre et rupture dans le fonctionnement trophique des lacs au cours du dernier millénaire

Principales publications associées : [16], [17], [23], [26], [28], [46]

Une approche paleolimnologique a donc été mise en œuvre sur un ensemble de lacs représentant des typologies différentes (tableau 1). La stratégie développée sur chacun des systèmes comprend :

- La caractérisation **d'un état écologique et fonctionnel actuel** par la mise en œuvre d'un IBL (Indice Biologique Lacustre, Verneaux et al. 2004).
- La **datation des archives sédimentaires** par différents moyens complémentaires : les datations radiocarbones et/ou les datations par les radio-éléments ^{137}Cs et le ^{210}Pb . **La période principalement ciblée est le dernier millénaire** avec un focus particulier sur **les deux derniers siècles**, période marquée par une accélération des activités humaines et de leurs impacts sur les milieux (cf l'**Anthropocène**).

- L'étude **multi-proxies** des archives sédimentaires qui inclue principalement l'analyse des assemblages de Chironomidae couplée à d'autres descripteurs du fonctionnement lacustre (Corg, C/N, diatomées, pigments ...) et des facteurs de l'environnement (Pollen, MNP ...).

Site	Zone géographique	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Surface (ha)	Profondeur (m)	Couverture chronologique	Nombre d'échantillons	Changement significatif	Analyste	Référence
Anterne	Alpes	6.707928699751875	44.23443089973996	2070	11,6	13	2010 AD - 200 AD	49	Non	L. Millet	Millet et al. 2009
Allos	Alpes	6.707928699751875	44.23443089973996	2230	50	35	2007 AD - 1880 AD	18	1	L. Millet	Non publié
Lauzanier	Alpes	6.872294300078004	44.37866290036892	2284	3	7,5	2010 AD - 50 BC	39	2	L. Millet	Non publié
Noir	Alpes	6.855349506202004	45.96426794384139	2600	2	19	2012 AD - 913 BC	49	2	S Belle	Non publié
Brévent	Alpes	6.82765400020881	45.9286240004752	2125	2,4	20	2012 AD - 616 AD	75	2	S Belle	Belle et al. 2016b
Mont Coua	Alpes	6.638808799993581	45.31744959997189	2797	2,3	10	2015 AD - 1580 AD	22	Non	I Cuellar - L Millet	Non publié
Chesery	Alpes	6.90359899793134	45.98579174406706	2135	0,4	6,2	2010 AD - 1500 AD	44	1	L Millet	Non publié
Anancy	Alpes	6.170333860209212	45.863046290881144	447	2759	65	2010 AD - 1870 AD	64	1	V Frossard	Frossard et al. 2013
Paladru	Alpes	5.530011599843463	45.45174199983313	500	390	36	2006 AD - 130 BC	63	2	L Millet	Non publié
Remoray	Jura	6.263198200586686	46.7717283004854	850	95	28	2007 AD - 426 AD	129	4	S Belle	Belle et al. 2016b
Narlay	Jura	5.912150700206016	46.64251190029456	750	41	39	2013 AD - 1105 AD	36	3	S Belle	Belle et al. 2016a
Maclu	Jura	5.906534993919488	46.62573865062676	780	24	26	2010 AD - 819 AD	31	Non	S Belle	Non publié
Claivaux	Jura	5.747461399885858	46.56624359953966	525	63,5	19	2010 AD - 700 AD	36	1	S Belle	Non publié
Bourget	Jura	5.869583127787337	45.72756137528703	232	4450	145	2010 AD - 400 BC	64	1	L Millet	Millet et al. 2010
Longemer	Vosges	6.954273400250852	48.06768839899533	736	76	34	2013 AD - 347 BC	49	Non	S Belle	Belle et al. 2017
Gerardmer	Vosges	6.855239900200689	48.06866710008316	660	116	38	2013 AD - 330 AD	34	3	S Belle	Belle et al. 2017
Aratille	Pyrénées	-0.174667000300887	42.800875000020211	2247	6	12	2013 AD - 670 AD	23	Non	V Frossard - L Millet	Non publié
Gentau	Pyrénées	-0.4874014001008009	42.84874169958052	1950	9,3	20	2013 AD - 1030 AD	37	1	V Frossard	Non publié
Port Biehl	Pyrénées	0.1872070000011061	42.87280100002759	2313	16,4	19	2014 AD - 1050 AD	21	1	L Millet	Non publié
Isaby	Pyrénées	0.02302919994241481	42.95112210055537	1562	6,3	6	2014 AD - 630 AD	11	1	L Millet	Non publié
Barroude	Pyrénées	0.1445256998384048	42.73103760039309	2355	9,4	9	2012 AD - 340 AD	40	1	V Frossard	Non publié

Tableau 1 : liste des lacs étudiés, localisation et caractéristiques générales des sites et des enregistrements sédimentaires associés.

II.B. 1 Aperçu synthétique des grandes ruptures dans le fonctionnement des lacs étudiés

Sur chacun des enregistrements étudiés à ce jour, une analyse simple de cluster permet de déterminer la profondeur des changements majeurs dans la composition des assemblages de Chironomidae correspondant à des ruptures dans le fonctionnement lacustre. Les modèles âge/profondeur disponibles sur chacune des séquences sédimentaires permettent de déterminer la distribution de probabilités des âges pour chacune de ces ruptures fonctionnelles majeures (fig. 18) Même si le nombre d'enregistrements lacustres considérés est encore limité (voir tableau 1), les fréquences cumulées des âges obtenus pour ces changements majeurs (fig. 18) au cours des 1200 dernières années semblent suivre une distribution chronologique particulière.

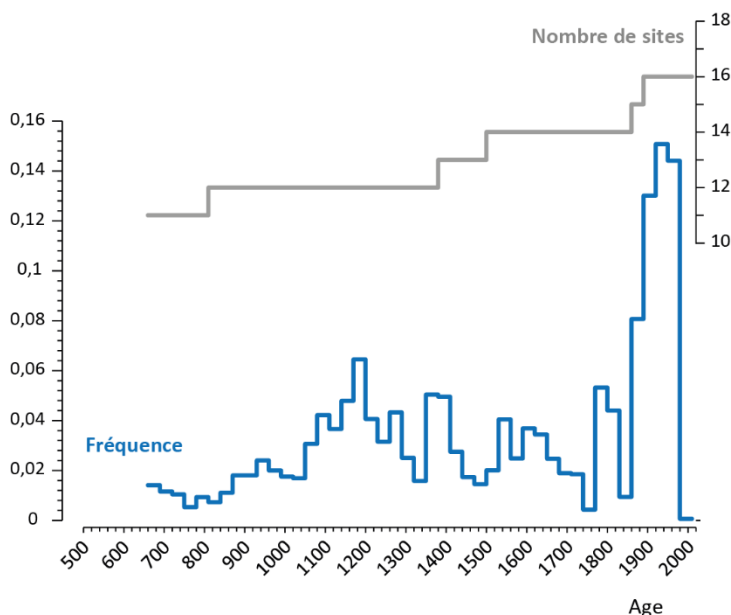


Figure 18 : Fréquences cumulées des âges des changements majeurs de composition des assemblages de Chironomidae dans les archives lacustres étudiées à ce jour. 16 lacs sur les 21 étudiés au total sont caractérisés par au moins un changement significatif (voir tableau 1).

▪ Les 150 dernières années : sièges de ruptures inégales sous influence anthropique

Le résultat le plus remarquable de l'analyse synthétique présenté par la figure 18 est le pic de fréquence obtenu pour une période allant de la fin du 19^{ème} à la fin du 20^{ème} siècle. Les analyses diachroniques multiproxies réalisées sur la plupart de ces 12 systèmes ont montré que :

- Les **changements fonctionnels** associés sont **d'une amplitude inégale** relativement aux fenêtres chronologiques documentées par les différents enregistrements sédimentaires. Dans la plupart des cas étudiés, la résultante est la mise en place **d'une « zone morte » dans la zone profonde** marquée par la disparition des communautés de Chironomidae consécutive à la prévalence de conditions d'oxygénation (hypoxie prolongée ou anoxie) trop contraignantes.
- Ces bascules fonctionnelles résultent des **impacts directs de facteurs de stress d'échelle locale** et sont donc particuliers à chaque système. **L'eutrophisation** provoquée par l'intensification des pratiques agropastorales et/ou par des apports ponctuels liés aux rejets d'eaux vannes semble cependant le **mécanisme de perturbation le plus fréquent**. Parmi les autres facteurs anthropiques potentiellement responsables de ces dysfonctionnements, **la gestion des communautés pisciaires** (introduction de poisson dans des lacs apicoles, modification des communautés, empoisonnement régulier ...) émerge également comme **un facteur prégnant**.
- **Le changement climatique n'est jamais le moteur principal** des changements fonctionnels observés. Il peut agir cependant comme un **facteur secondaire** en amplifiant indirectement les effets des perturbations anthropiques d'échelle locale. Le cycle thermique des lacs est notamment en relation étroite avec les conditions climatiques. Dans le contexte géo-climatique des lacs étudiés, l'élévation des températures (annuelles et saisonnière) augmente potentiellement la durée de stratification, sa stabilité et la profondeur de la thermocline et peut diminuer l'efficacité des brassages et du renouvellement de l'oxygène dans l'hypolimnion. La sensibilité des systèmes lacustres est sans doute liée à leur typologie. Ainsi, les grands lacs monomictiques périalpins (Annecy, Bourget, Paladru) sont plus particulièrement vulnérables à l'augmentation des températures hivernales qui conditionnent l'efficacité du brassage et la recharge en oxygène des couches aphotiques tropholytiques.

▪ La période 700-1870 AD : hétérogénéité des réponses et impacts du climat

Pour la période antérieure à la fin du 19^{ème} siècle, la courbe des fréquences cumulées des âges des changements de composition des assemblages de Chironomidae suggère une plus grande **hétérogénéité dans leur distribution chronologique**. Le nombre encore sans doute trop faible d'enregistrements sédimentaires inclus dans l'analyse ne permet que la proposition de premières hypothèses qui restent encore à vérifier et compléter par l'étude de nouvelles séquences.

En première approche, il semble que **le climat soit le facteur de contrôle principal** de ces ruptures fonctionnelles alors que les **impacts anthropiques** liés à la mise en place des paysages agropastoraux et du développement des usages et des pratiques associés **restent secondaires** (ex fig. 19).

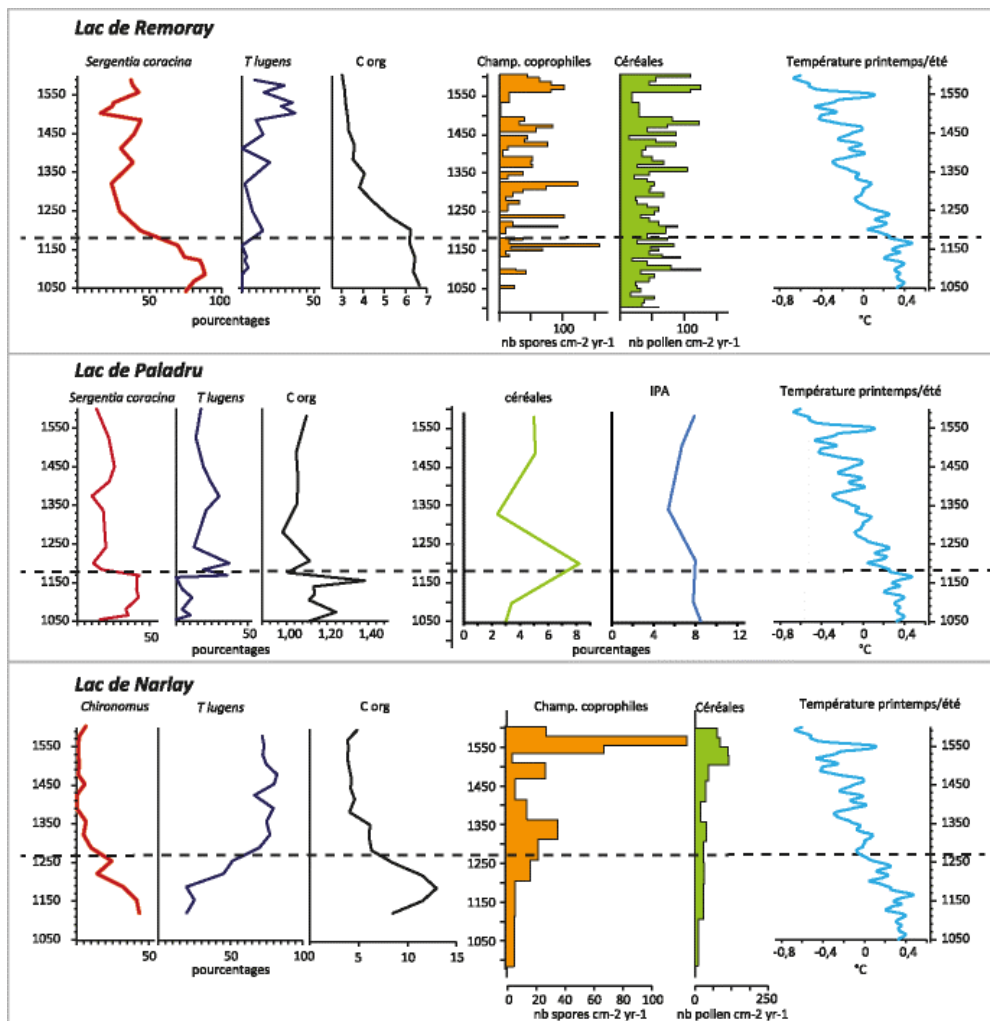


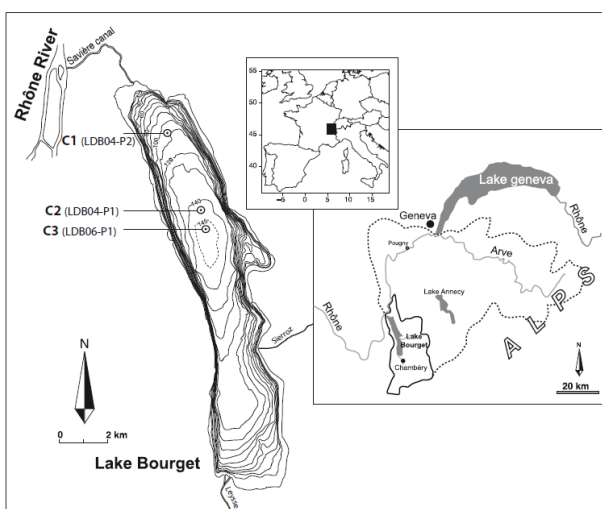
Figure 19 : Zoom sur l'intervalle chronologique compris entre 1050 AD et 1290 AD, marqué par des changements significatifs de la composition des assemblages de Chironomidae (courbe rouge et violette) dans 3 lacs de moyenne altitude : Paladru (Isère), Remoray et Narlay (Jura). Sur chacune de ces trois séquences, les changements de composition des assemblages de Chironomidae suggèrent une amélioration des conditions d'oxygénation de la zone profonde avec l'augmentation des abondances relatives d'un taxon oxyphile (*Tanytarsus lugens*-type pour les 3 enregistrements) et la baisse des pourcentages des taxons plus tolérants à l'hypoxie (*Sergentia coracina*-type pour Remoray et Paladru, et *Chironomus anthracinus*-type à Narlay). Cette interprétation est étayée par la baisse concomitante du pourcentage de carbone organique dans le sédiment indiquant une baisse probable des activités hétérotrophes de dégradation de la matière organique, consommatrices d'oxygène. Ces évolutions coïncident avec la baisse des températures caractéristique de la transition entre l'Optimum Médiéval et le Petit Age Glaciaire (courbe bleue d'après Guiot et al. 2010) mais aussi avec le développement des activités agro-pastorales locales. La courbe des flux de champignons coprophiles suggèrent notamment une augmentation du pâturage à Narlay et Remoray (courbe orange). Au lac de Paladru, il s'agit plutôt de défrichement et de mise en culture des sols au 12^{ème} siècle (courbe verte). Alors que les conséquences attendues du développement des activités agro-pastorales locales seraient une augmentation des apports organiques particuliers allochtones et/ou une augmentation des concentrations en nutriments dans la masse d'eau et donc de la production autochtone, les assemblages de Chironomidae et les pourcentages de Corg suggèrent au contraire une « re-oligotrophisation » du système. Ainsi, c'est plutôt le changement climatique associé à la transition POM/PAG qui semble constituer le moteur principal de ces changements fonctionnels.

II.B.2 Reconstitutions diachroniques des trajectoires fonctionnelles des grands lacs : l'exemple des lacs périalpins

Les grands lacs périalpins (Lac du Bourget, Annecy, Paladru, Aiguebelette ...) sont des pôles économiques, touristiques et écologiques régionaux importants, ils sont au cœur de paysages très anthropisés caractérisés par un développement agricole et urbain important. Les lacs du Bourget et d'Annecy ont connu une histoire récente mouvementée. D'un état oligotrophe avant les années 50 comme suggéré par les rares données de suivi de l'époque, ils ont subi une eutrophisation accélérée et sont passés à un état mésotrophe pour Annecy et hyper-eutrophe pour le Bourget dans les années 70. Ils ont été également gérés sur le plan pisciaire (ex introduction et maintien de population de Corégones) et ont bien évidemment subi le changement climatique récent. Aujourd'hui, on constate pour les deux lacs le retour -a priori satisfaisant- à un état oligo-mésotrophe, résultat de vastes plans de remédiation impliquant plus particulièrement la collecte et le traitement des eaux vannes (abattement des intrants en nutriments).

Cependant, le monitoring des colonnes d'eau (données SOERE « OLA ») et les diagnostics IBL indiquent deux situations actuelles contrastées : alors que le lac d'Annecy est caractérisé par un bon fonctionnement (sous-indice Df de l'IBL proche de 1 traduisant une bonne efficacité des transferts de matière dans les réseaux trophiques) et une hypoxie estivale limitée à la zone la plus profonde, le lac du Bourget est marqué par une anoxie prolongée de l'hypolimnion en période de stratification et un fonctionnement trophique non optimal (sous-indice Df de l'IBL proche de 0.5/1). Ainsi, ces deux grands lacs soumis à l'impact des activités anthropiques locales et du changement climatique récent et ayant bénéficié de mesures de restauration moderne constituent des modèles de premier plan pour l'étude de la trajectoire fonctionnelle des systèmes écologiques mettant potentiellement en jeu des phénomènes de résilience, de bascules et d'hystérèse.

▪ La trajectoire du lac du Bourget



Trois enregistrements sédimentaires prélevés dans les sédiments de la zone profonde du lac du Bourget ont été étudiés en parallèle (C1, C2, C3, fig. 20, Millet et al. 2010).

Figure 20 : Carte de localisation du lac du Bourget et positions bathymétriques des 3 sondages étudiés. La carotte C1 documente les 2 500 dernières années tandis que les carottes C2 et C3 couvrent à plus haute résolution les 200 dernières années. La carotte C1 a été prélevée à 100 m de profondeur, tandis que les carottes C2 et C3 ont été prélevées à 145 m de profondeur.

La reconstitution de la dynamique des assemblages de Chironomidae au cours des 2 500 dernières années montre qu'une rupture majeure se produit au cours du 20^{ème} siècle et interrompt la stabilité millénaire (fig. 21). La communauté de référence oxyphile disparaît ; elle est remplacée par des Chironomidae caractéristiques des zones littorales et dont les restes subfossiles ont été re-déposés secondairement dans les sédiments de la zone profonde.

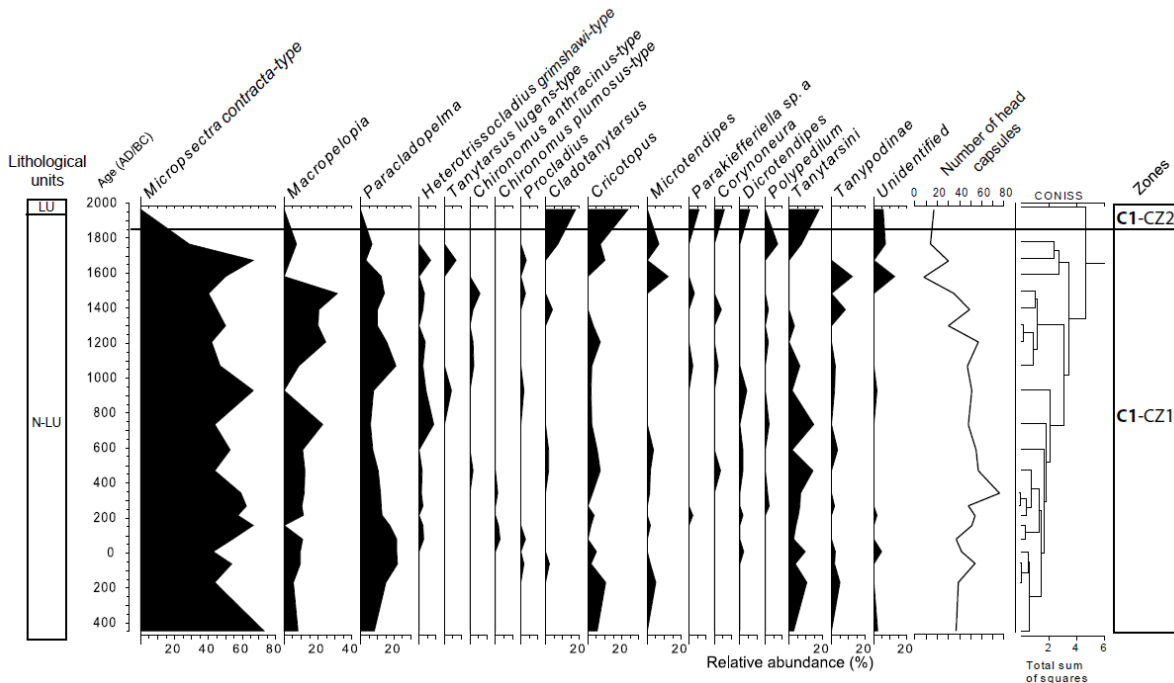


Figure 21 : Changement stratigraphique de la composition des assemblages de Chironomidae le long de la carotte C1, prélevée à 100 mètres de profondeur et couvrant les 2500 dernières années. L'enregistrement montre une stabilité remarquable des assemblages pendant la majeure partie de cette période (Fig. 21, Biozone C1-CZ1). Les communautés de Chironomidae sont alors dominées par *Micropsectra*, *Paracladopelma*, *Macropelopia* et *Heterotrissocladus*. Cette association taxonomique est typique des zones profondes des grands lacs oligotrophes comme par exemple le Lac Léman avant son eutrophisation (avant les années 40, Lods-Crozet & Lachavanne 1994) ; elle peut donc être considérée comme la communauté de référence du Lac du Bourget. Le seul changement statistiquement significatif dans la composition des assemblages se produit dans le dernier échantillon (l'échantillon de surface). La communauté de référence disparaît ; elle est remplacée par des Chironomidae caractéristiques des zones littorales. Une des hypothèses la plus probable est la disparition des Chironomidae de la zone profonde, où l'on ne retrouve plus que des restes fossiles produits dans les zones littorales et re-déposés secondairement dans les sédiments de la zone profonde.

Les carottes C2 et C3 permettent de réaliser un focus chronologique sur les 200 dernières années, période clé de l'histoire du lac (Fig. 22). L'ensemble des marqueurs étudiés en parallèle permettent de reconstituer l'histoire trophique du lac :

- Jusque vers 1900, le lac est dans son état de référence : conditions oligotrophes dans la masse d'eau, conditions d'oxygénation favorables dans l'hypolimnion (eaux profondes),
- Entre 1900 et 1943, les premiers signes de perturbations apparaissent avec une légère augmentation des nutriments dans la masse d'eau, une accumulation plus marquée de matière organique dans les sédiments et une dégradation sensible des conditions d'oxygénation hypolimnétiques,

- 1943 marque un tournant dans l'histoire du lac : l'eutrophisation s'accélère brusquement et des conditions hypoxiques s'installent de façon pérenne dans l'hypolimnion,
- A partir de 1960, la perturbation du système atteint un nouveau seuil : l'accumulation organique sédimentaire est maximale et les eaux hypolimnétiques sont totalement anoxiques, la zone profonde est une zone « morte » pour les communautés de macro-invertébrés benthiques.
- A partir de 1996, les diatomées montrent une amorce de retour vers un état initial tandis que les autres marqueurs ne montrent pas de signes d'amélioration de l'état écologique du lac.

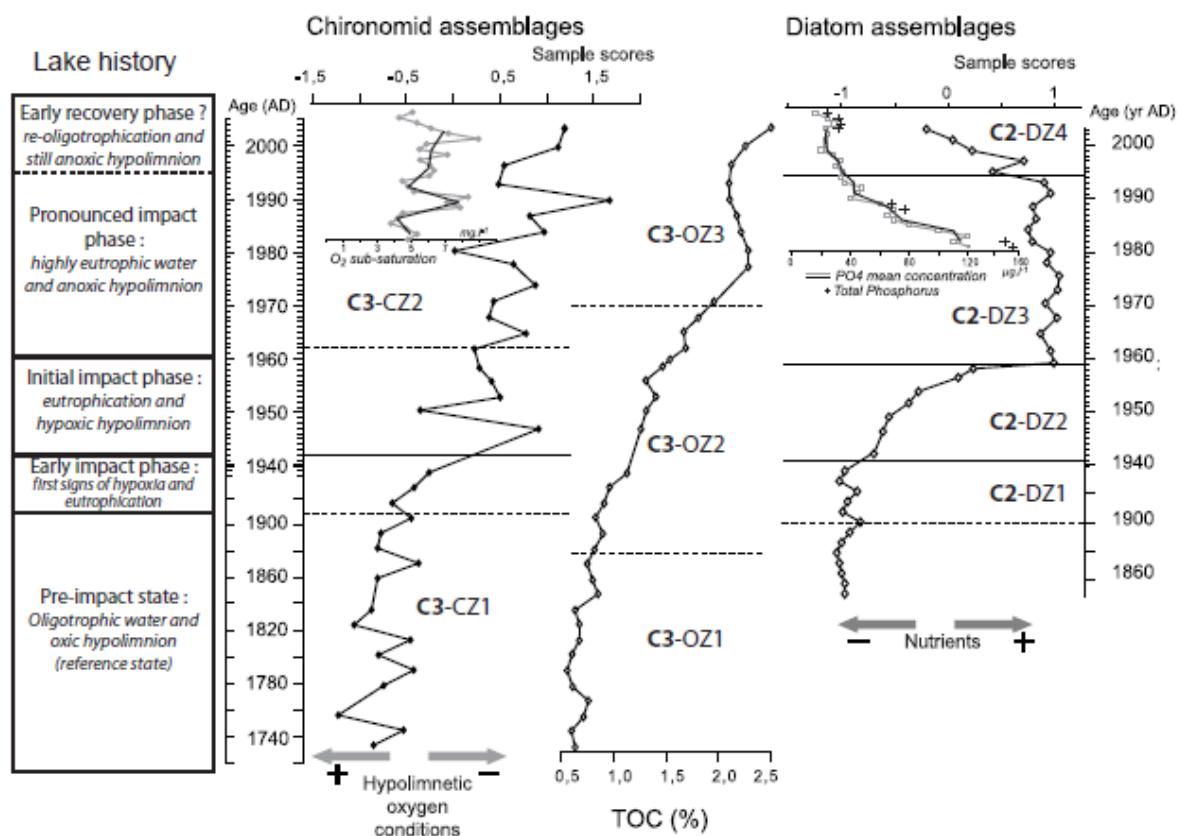


Figure 22 : Synthèse de l'histoire écologique récente (les deux derniers siècles) du lac du Bourget appréhendée par l'étude des assemblages de Chironomidae (carotte C3), de diatomées (carotte C2), de la matière organique dans le sédiment (carotte C3). TOC : carbone organique total. Les successions des assemblages de Chironomidae et de diatomées sont synthétisées par les évolutions stratigraphiques des scores des échantillons le long de l'axe 1 d'une AFC (une AFC Chironomidae et une AFC diatomées). La dynamique des assemblages de Chironomidae est gouvernée par les changements des conditions d'oxygénation dans la zone profonde. Les valeurs faibles des scores correspondent à des échantillons caractérisés par la communauté de référence, typique de conditions d'oxygénation favorables ; au contraire les valeurs élevées de scores correspondent à des échantillons marqués par la disparition de la faune profonde indiquant des conditions d'oxygénation contraignantes (hypoxie-anoxie). La dynamique des assemblages de diatomées révèle l'évolution des concentrations en nutriments dans la colonne d'eau. Les valeurs faibles des scores correspondent à des échantillons caractérisés par la communauté de référence, typique de conditions oligotrophes, au contraire les valeurs élevées de scores correspondent à des échantillons marqués par la dominance de communautés caractéristiques des milieux eutrophes. D'après Millet et al. 2010.

▪ La trajectoire du lac d'Annecy

Le lac d'Annecy a été étudié dans le cadre du projet ANR Iper-Retro coordonné par Marie-Elodie Perga. Ce projet m'a donné l'occasion de participer à la conception de la problématique et de la stratégie, et de co-encadrer la thèse de Victor Frossard (2009-2013). Une approche multi-carottes couvrant un gradient bathymétrique et une stratégie multiproxies ont permis de reconstituer la trajectoire fonctionnelle du lac au cours des 150 dernières années (fig. 23).

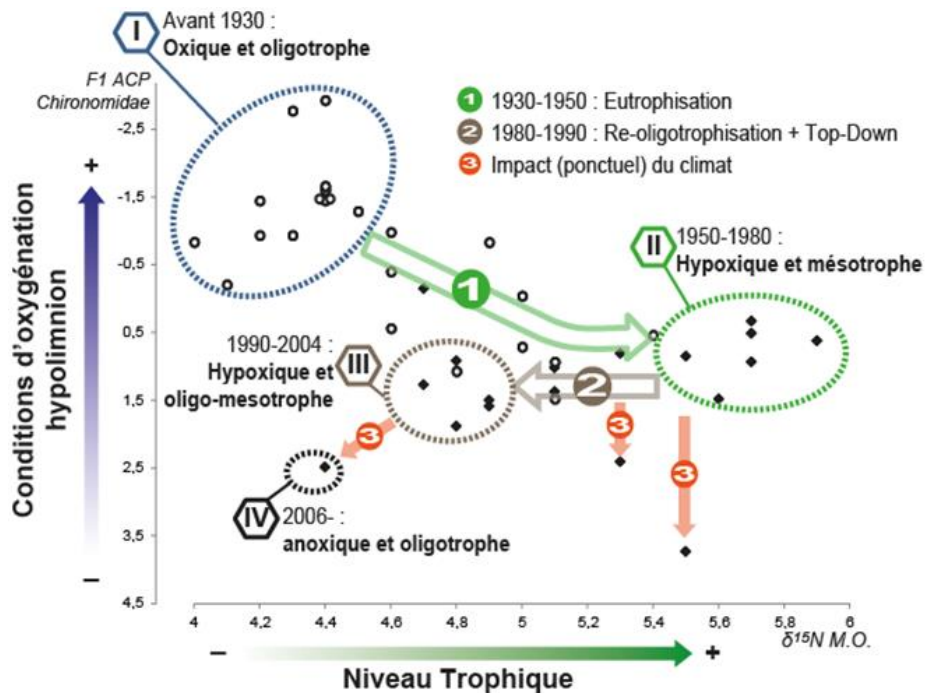


Figure 23 : Trajectoire fonctionnelle du Lac d'Annecy au cours des 150 dernières années par une approche de type retro-observatoire. Les conditions d'oxygénation hypolimnétiques sont reconstituées d'après les assemblages de Chironomidae. Le niveau trophique est reconstitué d'après la signature $\delta^{15}\text{N}$ de la matière organique. La trajectoire écologique du lac est caractérisée par 4 états successifs (I à IV) résultants de 3 processus différents (1 à 3, eutrophisation, re-oligotrophisation, changement climatique). Avant 1930, le lac est oligotrophe et les conditions d'oxygénation sont favorables au développement des taxons de Chironomidae oxyphiles (ex *Micropsectra*) y compris dans la zone profonde. Entre 1930 et 1950, l'eutrophisation du lac entraîne une dégradation des conditions d'oxygénation dans l'hypolimnion. Cette trajectoire n'est pas réversible puisqu'entre 1980 et 1990, malgré la ré-oligotrophisation des eaux, l'hypoxie persiste, probablement favorisée par une réorganisation des réseaux trophiques. En effet, les poissons zooplanctonophages, dont les populations sont artificiellement maintenues et développées, exercent un effet « top-down » sur l'édifice trophique. Même si les concentrations en nutriments et la production phytoplanctonique diminuent, la réduction du broutage par le zooplancton maintient à un niveau élevé le flux de MO non transférée vers le compartiment sédimentaire. L'état « hypoxique » semble moins résilient face aux événements climatiques abrupts. Depuis 2006, le réchauffement climatique est responsable d'une nouvelle dégradation des conditions d'oxygénation profondes (anoxie, zone profonde « morte ») et d'une importante perte de biodiversité associée.

▪ **Bilan : des « regime shifts » dans les grands lacs ?**

Pour ces deux grands lacs l'approche paleolimnologique a fait preuve de son efficacité pour montrer la prévalence d'un **état d'équilibre stable antérieur au XXème siècle et ainsi définir un état de référence spécifique** à chacun des deux systèmes. Elle montre également que l'état fonctionnel actuel n'est pas « référentiel » mais constitue l'aboutissement d'une trajectoire écologique récente ou **l'homme et ses activités jouent le rôle de premier plan**. L'étude des différents proxies le long des archives sédimentaires mets en lumière les impacts des différents stressseurs (l'eutrophisation accélérée, la gestion piscicole et le climat) sur le fonctionnement des systèmes et la perte de biens écosystémiques associés à cet état actuel dégradé (zone profonde morte ou « dead zone »).

Finalement, la retro-observation mise en œuvre sur ces deux grands lacs périalpins nous permet de proposer deux hypothèses alternatives concernant leur trajectoire écologique. Dans ces schémas d'évolution inspirés de ceux décrits par Scheffer et al. (2001), l'état de l'écosystème est évalué par les conditions d'oxygénation hypolimnétiques, résultantes de la quantité et de la qualité des apports de matière organique, de l'efficacité de leur transfert dans les réseaux trophiques et du cycle thermique du lac (stratification, brassages).

Hypothèse 1 : Dans cette hypothèse, le schéma d'évolution décrit par Scheffer et al. (2001) et caractérisé par une bifurcation majeure ou « regime shift » difficilement réversible (hysteresis) est calqué aux trajectoires temporelles mises en lumière par les approches restrospectives. Dans ce schéma, le stressseur principal est l'eutrophisation (augmentation des nutriments et de la production lacustre). Les données paleolimnologiques acquises sur **le lac du Bourget** peuvent s'adapter à ce schéma (fig. 24). La bifurcation se produit aux environs des années 40 quand la matière organique lacustre produite et non transférée dépasse un seuil critique sous l'effet de l'eutrophisation accélérée de la masse d'eau. Le nouvel état d'équilibre est depuis caractérisé par des conditions anoxiques dans la zone profonde, une perte de biodiversité (et la mise en place d'un fonctionnement trophique différent marqué par l'apparition et le développement de nouvelles voies métaboliques et de transfert du carbone dans les réseaux trophiques, voir partie suivante). Cet état « non désiré » est stable, puisqu'il se maintient malgré la ré-oligotrophisation du lac (effet d'hysteresis).

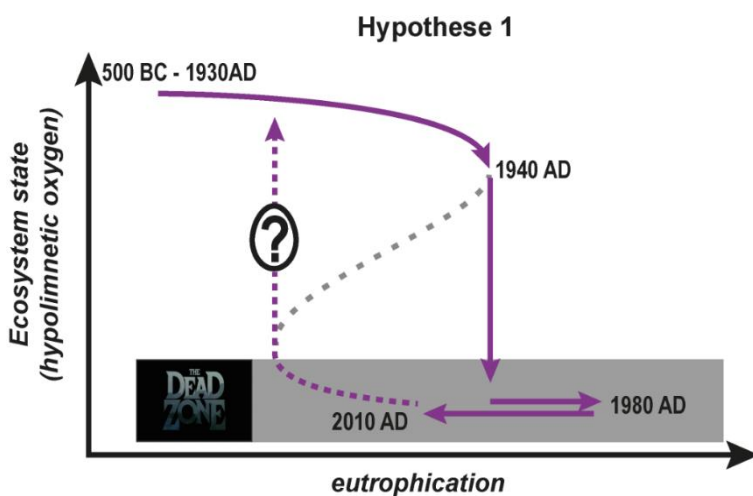


Figure 24 : Schéma de trajectoire fonctionnelle où l'état de l'écosystème, apprécié d'après les conditions d'oxygénation hypolimnétiques, est principalement contrôlé par l'eutrophisation (augmentation des nutriments et de la production primaire) à l'exemple du lac du Bourget. Dans les années 40, le système aurait basculé dans un nouvel état stable, associé à la prévalence de conditions anoxiques dans la zone profonde et à une perte de biodiversité et de fonctionnalité. Malgré la restauration de l'état trophique de la masse d'eau depuis les années 80, le système se maintient dans cet état dégradé.

L'étude des enregistrements sédimentaires **du lac d'Annecy** suggèrent que si l'eutrophisation a bien été le facteur de contrôle initial de l'évolution du système, la gestion piscicole et le changement climatique lui ont ensuite succédé pour impacter le fonctionnement et l'état du système. Ces résultats nous conduisent à proposer une seconde hypothèse (fig. 25).

Hypothèse 2 : Dans cette hypothèse, le stresser n'est plus l'eutrophisation mais la quantité (et la nature) de la matière organique qui atteint la zone tropholytique (ou la consommation d'oxygène par les activités métaboliques hétérotrophes ne sont plus compensées par la production primaire photosynthétique). Depuis les années 30 et jusqu'aux années 2000, le flux de MO augmente d'abord sous l'effet de l'eutrophisation (surproduction, effet bottom-up) puis en réponse à la gestion piscicole (inefficience des transferts, effet « top-down »). La dégradation consécutive des conditions d'oxygénation dans la zone profonde est sans doute réversible par la mise en œuvre de mesures de gestion adaptée. Cependant, cette évolution à long terme a probablement aujourd'hui diminué la résilience du système face à l'aléa climatique. En effet, le compartiment sédimentaire a accumulé une grande quantité de matière organique et constitue un réservoir important en certains éléments (ex P) solubles en conditions réductrices. Un événement climatique « stochastique » comme par exemple un hiver particulièrement chaud (dont la fréquence risque d'augmenter avec le changement climatique) pourra entraîner la bascule du système vers un nouvel état stable caractérisé par une zone profonde anoxique en permanence. Un brassage incomplet de la colonne d'eau serait suivi par la mise en place d'une anoxie prolongée (plusieurs années) de la zone profonde et pourrait engendrer le relargage d'une quantité importante d'éléments dissous sous l'effet des conditions fortement réductrices. La barrière de densité ainsi créée dans la zone profonde ferait basculer définitivement le lac vers un fonctionnement méromictique stable, caractérisé par une zone profonde anoxique en permanence (monimolimnion).

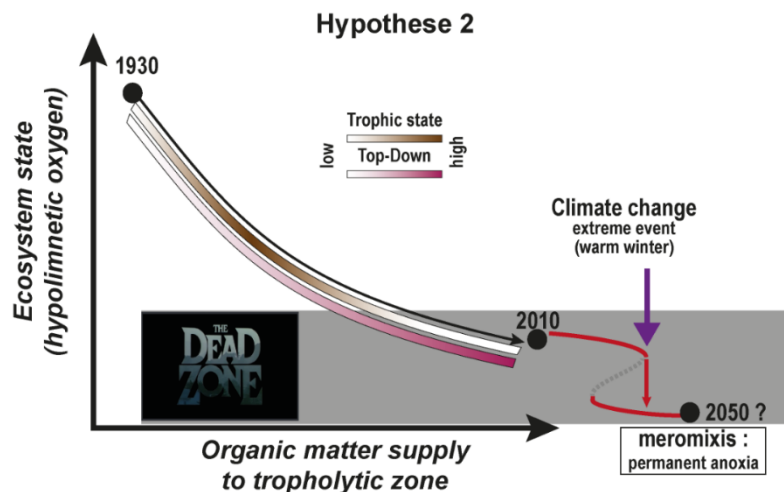


Figure 25 : Schéma de trajectoire fonctionnelle où l'état de l'écosystème, apprécié d'après les conditions d'oxygénation hypolimnétiques, est principalement contrôlé par la quantité et la qualité de la matière organique apportée à la zone tropholytique. L'eutrophisation puis la gestion piscicole ont diminué la résilience du système à l'exemple du lac d'Annecy. Le système est aujourd'hui vulnérable au changement climatique et la probabilité d'une bascule fonctionnelle majeure est augmentée.

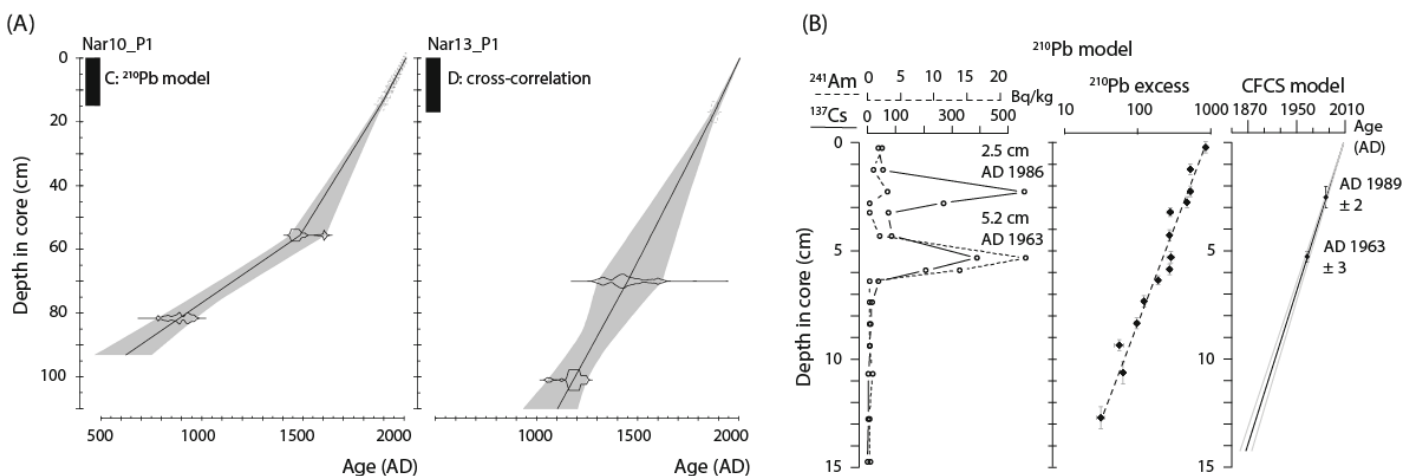
II.B.3 Trajectoires fonctionnelles des petits lacs de montagne : l'exemple du lac de Narlay

Dans la continuité de mes travaux de post-doc puis du projet Iper-retro focalisés sur l'étude des grands lacs périalpins, une approche rétrospective multiproxis a été initiée sur une série de petits lacs jurassiens, alpins, pyrénéens et vosgiens. Ces travaux ont notamment été réalisés dans le cadre d'un projet financé par la région Franche-Comté (projet REVEL : Réponse et Vulnérabilité des Ecosystèmes Lacustres de montagne aux changements globaux : états actuels et trajectoires écologiques passées), des projets ANPYR, ROCEPAL et FISH2 (coord. D Galop), et de la thèse de Simon Belle (2012-2015). Ils s'inscrivent également dans plusieurs dispositifs partenariaux chercheurs-gestionnaires : la Zone Atelier Arc Jurassien (ZAAJ), L'Observatoire Homme Milieu (OHM « Haut Vicdessos ») et les réseaux « Lacs sentinelles ».

L'étude du lac de Narlay illustre bien la stratégie (carottage, datation, approche multiproxis) mise en œuvre sur les petits lacs de moyenne et de haute montagne. Les résultats présentés sont issus du travail de thèse de Simon Belle (Belle et al. 2014, Belle et al. 2016a).

Le lac de Narlay (46°64N, 5°91E) est un petit lac jurassien situé à 750 m d'altitude. Malgré une surface réduite (41 ha), le lac de Narlay se caractérise cependant par une profondeur maximale importante (ca 40 m). Au cours du XXème siècle, le lac de Narlay a reçu les effluents d'une laiterie et d'une porcherie responsables de l'eutrophisation accélérée du système. Aujourd'hui, malgré le traitement des effluents mis en place à partir des années 80, la zone profonde du lac reste marquée par une hypoxie prolongée pendant la stratification estivale.

Deux carottes (Nar10_P1 et Nar13_P1) ont été prélevées dans les sédiments de la zone profonde



du lac. La chronologie des deux enregistrements sédimentaires repose d'une part sur la mesure en continue des activités des radioéléments ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am sur le sommet de carotte et d'autre part sur la datation radiocarbone de reste de la végétation terrestre pour les sédiments plus anciens (fig. 26).

Figure 26 : Modèles âge/profondeur des deux enregistrements sédimentaires du lac de Narlay, Deux datations radiocarbones ont été réalisées sur les sédiments profonds de chaque carotte. Les dépôts sédimentaires récents de la carottes Nar10_P1 ont été datés par les radioéléments ^{137}Cs , ^{241}Pb , et ^{210}Pb . La datation du sommet de la carotte Nar13_P1 a été indirectement obtenue par corrélation stratigraphique des profils de susceptibilité magnétique avec Nar10_P1.

L'approche multiproxies développée a inclus l'analyse des restes de Chironomidae subfossiles, de la matière organique (Corg, C/N), des pigments (caroténoïdes totaux), du pollen et des spores de champignons coprophiles (fig. 27). L'étude de ces marqueurs « classiques » a été complétée par l'analyse de proxies des sources et des voies de transfert du carbone dans les réseaux trophiques benthiques (signature isotopique du carbone de la MO et de la chitine des Chironomidae, ADN dégradé de bactéries méthanotrophes, cf partie suivante).

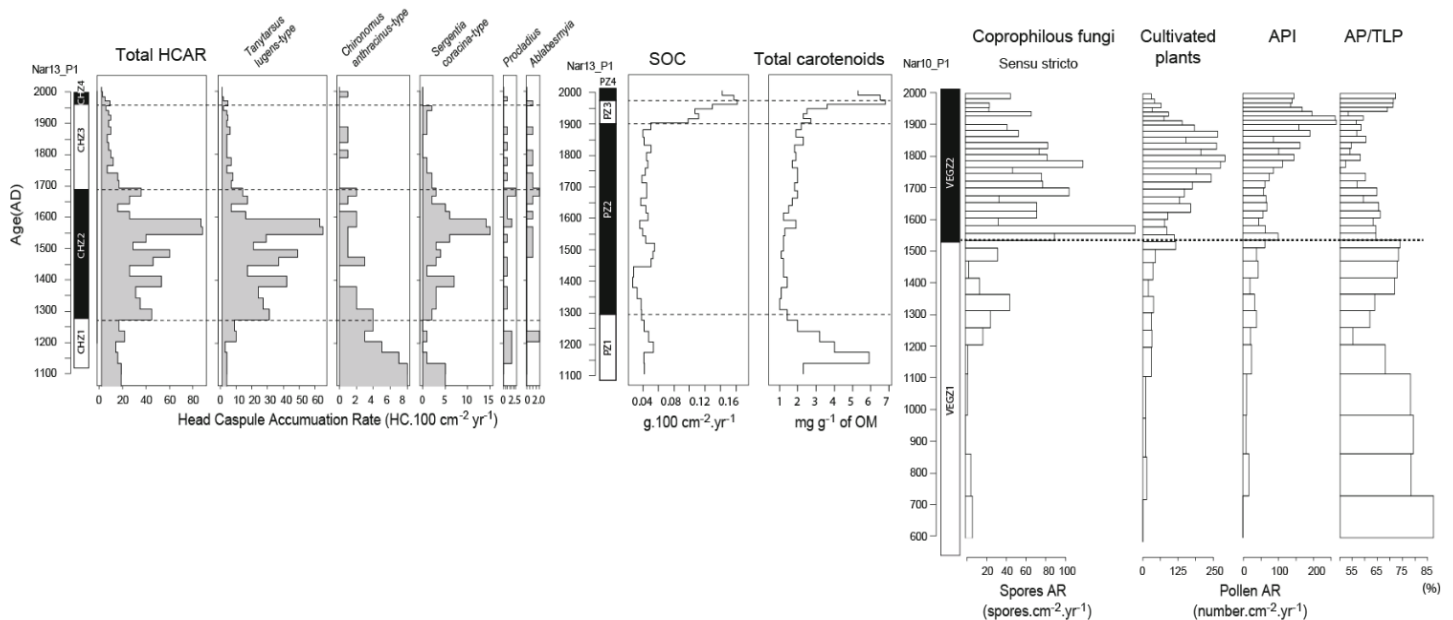


Figure 27 : Approche multiproxies menée sur l'enregistrement sédimentaire du lac de Narlay où les assemblages de Chironomidae, le carbone organique (SOC), les pigments (caroténoïdes), les spores de champignons coprophiles et les assemblages polliniques ont été étudiés en parallèle.

La trajectoire écologique du lac de Narlay est marquée par 3 changements principaux. Le premier se produit aux alentours de 1300 AD et est caractérisé par l'augmentation de l'abondance de taxa oxyphiles (*Tanytarsus lugens-type* et *Sergentia coracina*) et la diminution de *Chironomus anthracinus-type* plus oxy-tolérants. Ce premier changement est probablement dû à une baisse importante de la productivité lacustre (baisse des pigments et des flux de Corg) consécutive à la dégradation des conditions climatiques du Petit Age Glaciaire. Vers 1600 AD, un second changement est caractérisé par une baisse significative des abondances des taxa oxyphiles (*T. lugens-type* et *Sergentia*) qui ne sont pas remplacés par d'autres Chironomidae plus tolérants. Cette succession et la faiblesse du taux d'accumulation des Chironomidae de la zone profonde suggèrent la mise en place d'une forte contrainte oxygène dans la zone profonde (hypoxie). Le développement des pratiques agro-pastorales (cf augmentation des marqueurs de pastoralisme et de culture) combinés à une amélioration climatique ont probablement exercé en synergie un effet sur les concentrations en oxygène dans l'hypolimnion du lac.

Le dernier changement se produit vers 1950 AD : la désoxygénation de la zone profonde atteint un nouveau palier sous l'effet d'une eutrophisation accélérée. La zone profonde devient une « zone morte » où les conditions d'oxygénation sont trop contraignantes pour permettre le développement des communautés larvaires de Chironomidae. L'eutrophisation de la masse d'eau est probablement

moins liée aux apports diffus (baisse des marqueurs d'anthropisation) qu'à des apports ponctuels de nutriments en lien avec le développement des pratiques nouvelles et plus intensives (porcherie et laiterie). Le réchauffement actuel favorise probablement la force et la durée de la stratification estivale et renforce potentiellement les effets de l'eutrophisation sur les conditions d'oxygénation de la zone profonde.

Ce qu'il faut retenir

Jusqu'au 19^{ème} siècle, on constate une hétérogénéité des trajectoires fonctionnelles des systèmes étudiés. Les ruptures mises en évidence ponctuellement sont d'amplitude limitées et sont provoquées principalement par les changements du climat, même si localement l'impact anthropique peut jouer un rôle important.

Le 20^{ème} siècle est marqué par un changement de paradigme. Il est en effet marqué par une fréquence et des amplitudes inégalées dans les changements de fonctionnement trophique des lacs composant le corpus de systèmes étudiés. C'est l'Homme et ses activités locales qui sont alors responsables de ces bascules écologiques majeures notamment caractérisées par une perte de biodiversité. Le rôle du climat devient secondaire, mais reste un facteur potentiellement aggravant.

De nouvelles conditions physico-chimiques (hypoxie/anoxie), biologiques (zone profonde morte) et trophiques (surproduction phytoplanctonique, changement de communautés de producteurs primaires) se mettent en place.

Dans ce contexte de l'Anthropocène, les perturbations d'origine anthropiques ont probablement diminué la résilience des systèmes face aux changements climatiques en cours et à venir, augmentant la probabilité d'une bascule difficilement réversible des systèmes vers un état stable perturbé et la perte des services écosystémiques associés.

II.C Impacts sur les sources et les voies de transfert du carbone dans les réseaux trophiques benthiques

Principales publications associées : [24], [30], [33], [37], [38], [39], [40], [41], [43], [45]

Il s'agit dans ce volet de mes recherches et en collaboration avec mes collègues de Chrono-Environnement (V. Verneaux, H. Masclaux) d'évaluer l'impact de ces changements de conditions trophiques (accumulation de matière organique) et physico-chimiques (hypoxie ou anoxie dans la zone profonde) sur le transfert du méthane biogénique dans les réseaux trophiques benthiques.

II.C.1 Apparition et/ou développement de la méthanotrophie sous influence anthropique

Une approche « top-bottom » a été mise en œuvre dans le cadre de la thèse de S. Belle à partir de carottes de sédiments prélevées dans la zone profonde des 11 petits lacs jurassiens, vosgiens couvrant un large gradient typologique (altitude, conductivité, surface ...) et d'occupation des sols (forêt, zones humides, surfaces agropastorales ...). Les pigments (Chl-a, caroténoïdes), les signatures isotopiques du carbone de la matière organique et des restes subfossiles de larves de Chironomidae ont été analysés dans chaque échantillon « top » (période actuelle) et « bottom » (période médiévale ca 1000 AD).

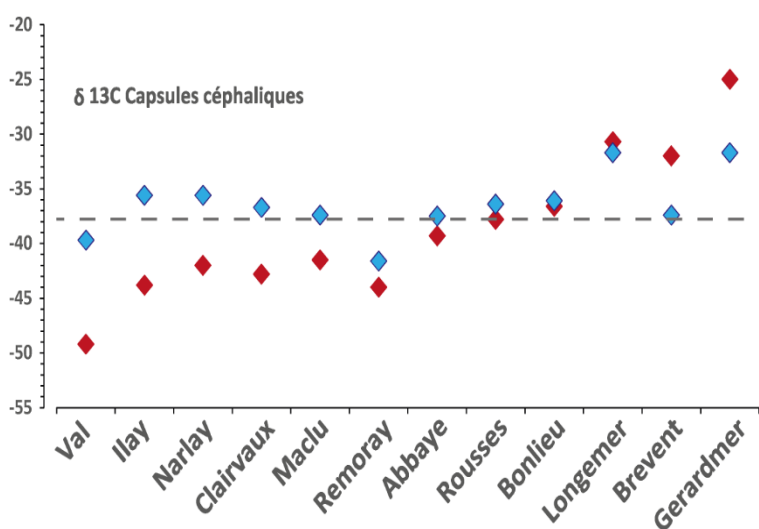


Figure 28 : Signature isotopique du carbone de la chitine des capsules céphaliques de Chironomidae contenus dans les échantillons de surface (en rouge) et les échantillons datant de l'époque médiévale (en bleu) prélevés le long de carottes sédimentaires. Pour 9 des 12 lacs on constate une diminution de la signature isotopique du carbone entre la période médiévale et la période actuelle. Cela indique une augmentation des processus de recyclage de la MO. Dans 8 des lacs étudiés, les valeurs devenues très négatives (valeurs inférieures à la limite en pointillé) indiquent une assimilation du carbone du méthane dans la biomasse des Chironomidae. D'après Belle et al. 2016.

Les résultats montrent l'existence d'une bascule majeure dans les cycles biogéochimiques lacustres entre la période médiévale et la période actuelle avec l'apparition et développement récents du métabolisme du méthane dans une grande proportion de systèmes (fig. 28).

Pour la période médiévale, on constate une relation significative entre la taille du bassin versant et les apports de matière organique terrestre, tandis que pour la période actuelle, l'influence anthropique devient prépondérante. Aujourd'hui, l'occupation des sols (% de terres agropastorales) exerce un contrôle direct sur la disponibilité en nutriments dans les masses d'eau, et indirect sur le cycle du carbone. Les résultats de l'étude démontrent plus particulièrement l'importance actuelle -et inédite- du transfert du carbone du méthane dans les réseaux trophiques benthiques.

II.C.2 la méthanotrophie : facteurs de contrôles internes et externes

▪ L'exemple d'une étude diachronique : l'approche pilote sur lac de Narlay (Jura)

Sur la séquence du Lac de Narlay, une approche interdisciplinaire innovante a été développée également dans le cadre de la thèse de S. Belle (fig. 29). Elle a combiné l'étude dans les sédiments d'une carotte prélevée dans la zone profonde (i) des assemblages subfossiles de Chironomidae, (ii) de la signature $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique et de la chitine des Chironomidae, (iii) de l'ADN dégradé des bactéries méthanotrophes (Met1, Met2 et NC10) et (iv) des marqueurs de l'anthropisation locale (pollen, spores de champignons coprophiles).

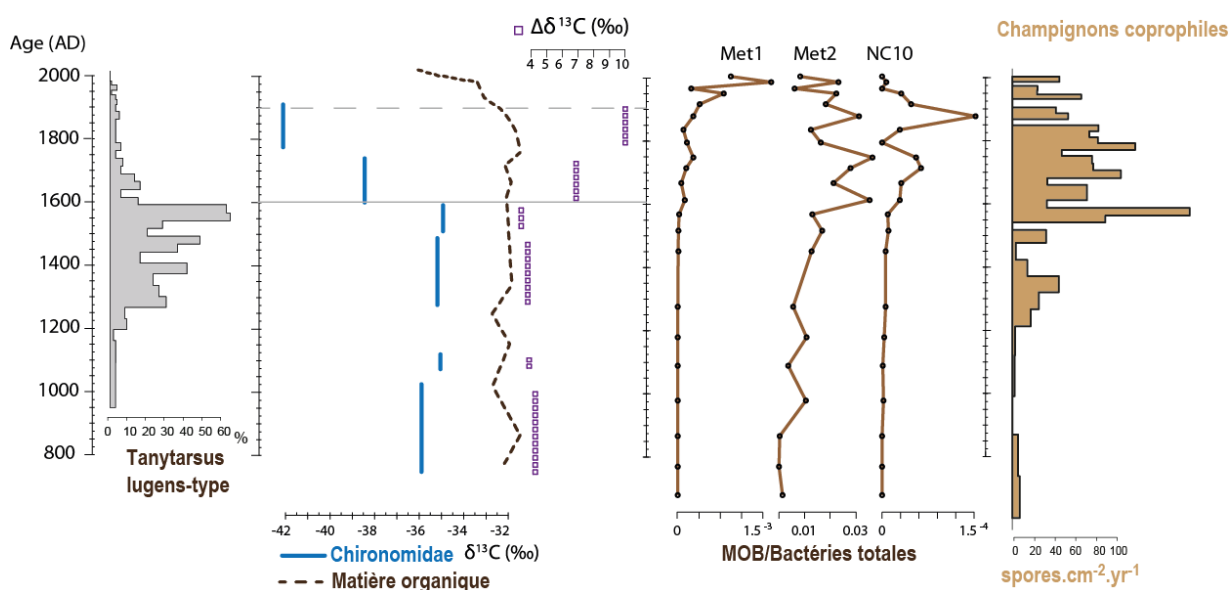


Figure 29 : Analyse multi-proxies de l'enregistrement sédimentaire du Lac de Narlay (Jura). La signature isotopique du carbone le $\delta^{13}\text{C}$ dans la chitine des capsules céphaliques de Chironomidae (en bleu) montre une rupture vers 1600. Jusqu'à cette date, le phytoplancton constitue probablement la source principale de carbone pour les Chironomidae. A partir de 1600, les larves de Chironomidae se nourrissent d'un mélange de production pélagique (habituellement avec un $\delta^{13}\text{C}$ de -36‰) et d'un type de matière organique avec une signature $\delta^{13}\text{C}$ beaucoup plus faible. Les bactéries méthanotrophes, avec un $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -90‰ et -60‰ , pourraient constituer cette nouvelle source de carbone. L'analyse de l'ADN dégradé conservé dans le sédiment confirme cette hypothèse en montrant à partir de 1600 une augmentation significative de la proportion relative de bactéries méthanotrophes (Met1, Met2 et NC10 en marron foncé) dans les communautés bactériennes. Même si les données polliniques montrent une anthropisation du bassin versant bien antérieure (défrichement et mise en culture), l'analyse des spores de champignons (en marron foncé) dans les sédiments indique une intensification des pratiques pastorales à partir du milieu du 16ème siècle. Ainsi, l'évolution du fonctionnement trophique du lac de Narlay marquée par l'apparition et le développement supposés de la méthanogénèse semble principalement déterminée par l'intensification des pratiques pastorales sur le bassin-versant. A partir de la fin du XVIème siècle, l'augmentation du cheptel a probablement entraîné une augmentation des apports en matières organiques allochtones et en nutriments et donc une augmentation de la biomasse algale produite dans le lac. La dégradation par les organismes hétérotrophes de cette matière organique autochtone et allochtone excédentaire accumulée dans les sédiments a entraîné une dégradation des conditions d'oxygénation dans les couches d'eau profondes comme le suggèrent la forte diminution des Chironomidae oxyphiles vers 1600 (*Tanytarsus lugens-type*). Ces nouvelles conditions sont donc devenues propices à la méthanogénèse et à la méthanotrophie. D'après Belle et al. 2014, 2016.

Cette étude interdisciplinaire a permis de démontrer que des facteurs de perturbation anthropiques d'échelle locale – le développement des pratiques agro-pastorales sur le bassin versant - ont modifié l'état écologique du système et engendré l'apparition d'une nouvelle voie métabolique au sein du système : la méthanogénèse. Cette voie de dégradation anaérobie de la matière organique conduit potentiellement à l'émission de méthane, puissant gaz à effet de serre. Finalement, cette étude a donc montré comment des facteurs de perturbation d'échelle locale pouvaient avoir des conséquences à l'échelle globale et plus particulièrement sur le réchauffement climatique en cours.

▪ **La méthanotrophie** dans les réseaux trophiques benthiques : **influences typologiques**

L'approche novatrice développée sur la séquence du Lac de Narlay et combinant l'analyse des communautés de Chironomidae, des isotopes stables du carbone, de l'ADN dégradé de bactéries méthanotrophes et des marqueurs des activités agro-pastorales locales, a été appliquée à **deux autres lacs de typologie différentes** : le Lac de Remoray dans le Jura et le Lac Brévent dans les Alpes (fig. 30).

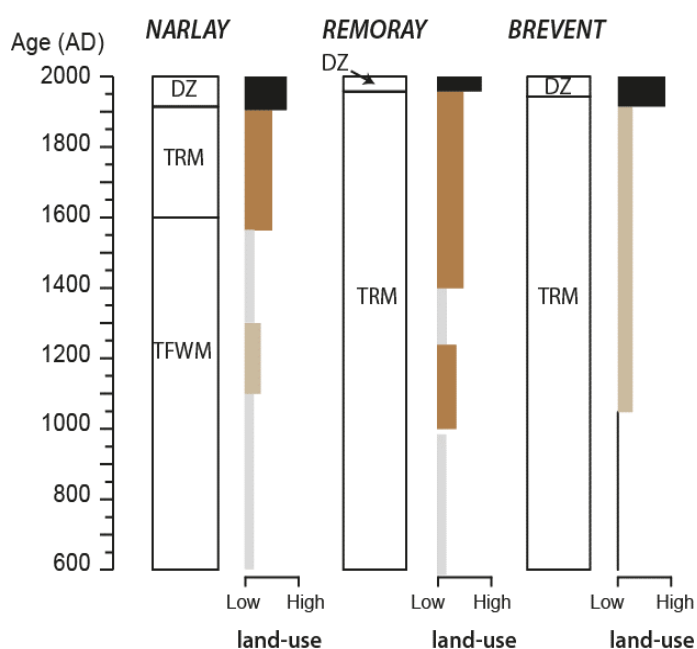


Figure 30 : Représentation schématique de l'évolution de la méthanotrophie (TRM : méthanotrophie, TFWM : pas de méthanotrophie) et des activités agropastorales au cours des 1400 dernières années aux lacs de Narlay, Remoray et Brévent. Dans les lacs de Remoray et du Brévent, la méthanotrophie est mise en évidence en continu pour les 1400 dernières années. Pour Narlay, la méthanotrophie est activée par les impacts anthropiques locaux au début du 17^{ème} siècle. Pour les 3 séquences, le développement des activités agropastorales locales au cours du 20^{ème} siècle a provoqué une eutrophisation accélérée et a donc modifié les conditions physico-chimiques dans la zone profonde qui sont devenues trop contraignantes pour la macrofaune benthique stoppant les couplages trophiques entre les compartiments benthiques et pélagiques. *D'après Belle et al. 2016.*

Les résultats obtenus confirment **l'importance du transfert du carbone issu du méthane biogénique** dans les réseaux trophiques des trois lacs étudiés. Cette source de carbone et d'énergie est produite grâce aux mécanismes de recyclage de la matière organique et transférée dans l'édifice trophique par le truchement de couplages entre les compartiments benthiques et pélagiques.

○ Dans certains lacs, ces mécanismes (ex Remoray et Brévent) correspondent à **la situation typologique naturelle** de ces systèmes lacustres. La zone profonde de ces lacs est naturellement hypoxique une partie de l'année et caractérisée par des conditions redox favorables à la production de méthane. Les conditions physico-chimiques restent cependant compatibles avec l'oxydation du méthane par les bactéries méthanotrophes et le transfert du carbone du méthane dans les réseaux trophiques benthiques (production de consommateurs benthiques : Chironomidae).

○ Dans d'autres lacs (comme Narlay), les mécanismes de production du méthane biogénique, de son oxydation et du transfert de carbone associée **sont activés par les impacts anthropiques locaux.**

○ Pour une grande majorité des lacs étudiés, **le développement des activités agro-pastorales locales au cours du 20^{ème} siècle** a provoqué une **eutrophisation accélérée** qui entraîne la **disparition d'un maillon « charnière »** assurant une partie **des couplages entre les compartiments benthiques et pélagiques** notamment via la consommation des nymphes émergentes de Chironomidae par les poissons. On peut supposer que ces conditions (anoxie + accumulation de MO + nutriments) favorisent la production de méthane biogénique (méthanogénèse).

Les couplages benthique/pélagique et le transfert du méthane via les consommateurs benthiques dépendent notamment de la typologie des systèmes et de l'état initial des communautés benthiques.

○ Dans les lacs caractérisés par une faune benthique oxyphile donc sensible à l'anoxie, le transfert du carbone du méthane via les communautés de Chironomidae de la zone profonde est limité et peu durable dans le contexte d'une eutrophisation accélérée.

○ Dans des lacs dont les communautés initiales ont un seuil de tolérance plus élevé vis à vis de l'hypoxie, le transfert du carbone du méthane via les consommateurs benthiques sera plus important et durable. Cependant, dès que les conditions d'oxygénation dépassent le seuil de tolérance de ces taxa, ce mécanisme de transfert s'interrompt.

Plusieurs questions restent aujourd'hui à résoudre, et notamment celle de l'influence de l'arrêt de la consommation des bactéries méthanotrophes par les macro-invertébrés de la zone profonde sur le transfert du méthane dans l'ensemble du réseau trophique lacustre et finalement sur l'émission de méthane gazeux par le lac. Une hypothèse est alors que le transfert du carbone du méthane est assuré par la consommation des bactéries méthanotrophes dans le compartiment pélagique par le zooplancton. La méthanotrophie peut également s'accélérer dans le compartiment benthique des zones littorales et sublittorales où les conditions d'oxygénation sont moins limitantes.

Ce qu'il faut retenir

Les changements de conditions physico-chimiques, biologiques et trophiques induites par les activités anthropiques locales modifient profondément le cycle du carbone des lacs.

Un des effets le plus marquant est l'apparition et le développement de la méthanotrophie, c'est dire du transfert du carbone issu du méthane dans les réseaux trophiques, benthiques en l'occurrence. La mise en évidence de la méthanotrophie constitue une preuve indirecte de l'augmentation potentielle de la production du méthane par les lacs. Même si une part significative de ce méthane est exploitée comme source de carbone par les organismes aquatiques, une partie échappe à ces transferts trophiques et est potentiellement émise par les lacs. Ainsi, des facteurs de perturbation d'échelle locale peuvent exercer des conséquences à l'échelle globale et plus particulièrement sur le réchauffement climatique en cours puisque le méthane est un puissant gaz à effet de serre.

Dans le contexte de l'Anthropocène, les perturbations anthropiques ont atteint un seuil provoquant la régression ou la disparition totale de la faune profonde des lacs. Les conséquences sur le cycle du carbone de la disparition de ce maillon charnière dans les réseaux trophiques, assurant une partie des couplages trophiques entre les compartiments benthiques et pélagiques, restent une question ouverte.

Chapitre III : Perspectives

Mon projet de recherche se place dans la droite ligne de mes travaux antérieurs et s'articulent donc selon deux axes majeurs et complémentaires: d'une part la reconstitution des changements du climat aux échelles plurimillénaires à séculaires et d'autre part la compréhension de l'histoire fonctionnelle des systèmes lacustres.

Les travaux antérieurs auxquels j'ai contribué, de la simple participation à des projets interdisciplinaires à l'animation de projets collaboratifs, ont mis en œuvre des approches originales, l'étude de sites et de périodes mal connus. A l'heure du bilan, il m'apparaît que l'expérience acquise au cours de ces recherches sans doute parfois trop foisonnantes me permet aujourd'hui de dégager des perspectives nouvelles de développement méthodologiques, et d'identifier de pistes de recherches prioritaires et prometteuses pour la reconstitution des changements du climat et de la trajectoire fonctionnelle des lacs.

III.A Une approche renouvelée pour la reconstitution quantitative du climat

III.A.1 Quel référentiel dans l'Anthropocène ?

Les reconstitutions des paléotempératures à partir des assemblages de Chironomidae ont montré toute leur pertinence que ce soit dans le cadre de mes travaux sur le Tardiglaciaire (ex Lac du Lautrey et le Lac d'Ech) et l'Holocène (Lac d'Anterne) ou bien plus largement dans la littérature scientifique internationale (Eggermont & Heiri 2014).

Cette approche repose sur la détermination des optima et tolérances des différents taxa de Chironomidae vis-à-vis de la température. Ces préférences sont déterminées par l'étude du référentiel actuel c'est-à-dire d'après la distribution moderne des assemblages dans un ensemble de lacs répartis le long d'un gradient thermique (altitude ou latitude).

La relation constatée entre la température et la composition des assemblages de Chironomidae est sans doute pour une partie le résultat d'une influence directe du climat sur les populations de Chironomidae aux différents stades de leur développement. Cependant, cette relation dépend pour une grande part d'influences indirectes via des impacts en cascade, par exemple sur la quantité et la qualité de la ressource alimentaire, et/ou sur les conditions d'oxygénation des zones profondes. Nos travaux sur la trajectoire fonctionnelle des systèmes lacustres ont contribué à montrer que dans le contexte de l'Anthropocène, les impacts de l'Homme ont bouleversé les équilibres initiaux dans un grand nombre de lacs. L'eutrophisation accélérée des lacs de basse et moyenne altitude, l'introduction de poissons dans les lacs de montagne ont engendré des modifications importantes du fonctionnement trophique (effets bottom-up et top-down) avec comme résultante une modification récente et inégalée des communautés de Chironomidae de façon indépendante des changements du climat.

Ce constat pose la question de la pertinence du référentiel actuel pour reconstituer les températures passées. Certes, une relation entre la température et la composition des assemblages de Chironomidae est aujourd'hui bien mise en évidence, mais cette relation -indirecte pour un grande part- a-t-elle été modifiée par l'influence anthropique ? Est-elle donc transposable aux périodes plus anciennes ou l'influence de l'Homme était moins prégnante ?

III.A.2 Développement d'une fonction de transfert « sub-actuelle » pour l'Europe

Pour répondre à ces questions et pour *in fine* améliorer la précision et la pertinence des reconstitutions quantitatives des températures déduites des changements de compositions taxonomiques des assemblages, je coordonne un projet dit « top-bottom » qui prévoit l'étude de la distribution des assemblages de Chironomidae dans les sédiments d'un ensemble de lacs (60 lacs du Jura, des Vosges, des Alpes, des Pyrénées, du Massif Central, du littoral aquitain et du sud de la France), couvrant de larges gradients typologiques, climatiques et fonctionnels (fig. 31) et ceci à deux périodes :

- La période actuelle représentée dans les échantillons de surface des carottes (échantillons « top »)
- Une période antérieure à la « Grande Accélération » de l'Anthropocène, pour notre projet, la période ciblée est la fin du 19^{ème} siècle. Même si les lacs ne sont pas indemnes de modifications anthropiques pendant cette période et les périodes antérieures, ces changements sont sans commune mesure avec les bouleversements survenus postérieurement au cours du 20^{ème} siècle. Cette période est donc considérée en première hypothèse comme période « de référence » ou « pre-perturbation » dans le cadre de notre approche.

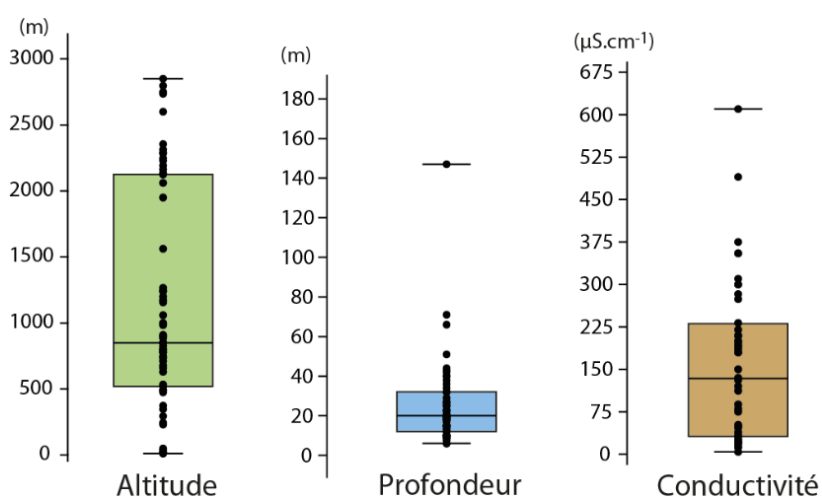


Figure 31 : Distribution des altitudes, des profondeurs et de la conductivité des lacs dont l'étude est en cours dans le projet « Top-bottom ». L'objectif est d'améliorer encore la diversité typologique et environnementale couverte par le jeu de données en augmentant le nombre de sites.

Dans une première étape, ce travail en cours vise à reconnaître et hiérarchiser les facteurs de contrôles de la distribution des assemblages de Chironomidae aux deux périodes en confrontant les données faunistiques avec les paramètres mésologiques (ex MO sédimentaire, niveaux trophiques, altitude, températures, les températures de la fin du 19^{ème} pourront par exemple être extraites des reconstitutions spatialisées disponibles, des longues séries d'observation ou issues de modèles).

Dans une seconde étape, et dans l'hypothèse où le facteur « climat » est identifié comme un facteur de contrôle important, il s'agira de comparer les distributions individuelles des différents taxa vis-à-vis des températures et de mettre en évidence l'existence –ou non- des « glissements » dans leurs optima et tolérances entre la fin du 19^{ème} et la période actuelle et en comprendre les ressorts.

Enfin, si des différences importantes sont ainsi mises en exergue, l'objectif final est de proposer une nouvelle fonction de transfert construite d'après la distribution des Chironomidae à la fin du 19^{ème} siècle qui sera ainsi susceptible de fournir des reconstitutions des climats passés non biaisées par

les impacts anthropiques récents sur le fonctionnement des lacs et les communautés de Chironomidae.

Le projet inclut à l'heure actuelle une soixantaine de lacs français. L'ambition est à court terme d'augmenter le nombre de lacs par le développement et la mise à profit du réseau de collaboration national (ex « réseau lacs sentinelles » pour les lacs alpins) et Européen (Italie, Espagne, Allemagne, Suisse).

III.A.3 La composition en isotopes stable de l'oxygène de la chitine comme proxy climatique

Une autre piste que je souhaite explorer est la possibilité de reconstituer les températures moyennes annuelles par l'étude de la signature isotopique de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) dans la chitine des capsules céphaliques de Chironomidae.

La composition en isotopes stable de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et de l'hydrogène (δD) des précipitations est fortement influencée par la température de condensation et la source de l'humidité (thermomètre isotopique). Dans certains systèmes lacustres (à faible évaporation, avec un transfert rapide de l'eau de pluie vers le lac, sans influence d'apports karstiques ...), la signature isotopique de l'oxygène de l'eau est en équilibre avec celle des précipitations. Ainsi, dans ces systèmes, l'analyse des isotopes de l'oxygène dans un matériau intégrateur de la signature isotopique de l'eau peut permettre de reconstituer les variations des températures de l'air.

Les restes subfossiles chitineux de Chironomidae de la zone profonde des lacs présentent plusieurs avantages pour cette approche :

- La chitine des Chironomidae est géo-chimiquement stable, la signature isotopique de la chitine n'est pas modifiée significativement dans le sédiment.
- La composition en isotopes stable de l'oxygène de la chitine dépend pour une grande part de celle de l'eau, l'influence de la ressource alimentaire est minoritaire (Wooller et al. 2004, Wang et al. 2009).
- La durée du développement larvaire est longue et la chitine est donc susceptible d'intégrer une signature isotopique moyenne de l'eau sur un cycle annuel.
- Les Chironomidae colonisent les lacs siliceux où l'on ne retrouve pas de restes carbonatés (ex tests d'ostracodes). Cette approche isotopique peut donc être mise en œuvre sur de nouveaux terrains d'étude (Auvergne, Groenland, Vosges ...).
- Les Chironomidae sont benthiques, et les communautés de la zone profonde des lacs stratifiés se développent dans des conditions de températures constantes (de 4 à 6 degrés selon la profondeur de lacs). Les variations de température n'influent donc pas sur le fractionnement isotopique lors de l'intégration de l'oxygène de l'eau dans leur biomasse.

La faisabilité de l'approche a déjà été démontrée (fig. 32) à l'occasion de quelques rares travaux pionniers (ex Wooller 2004, Verbruggen et al. 2011, Mayr et al. 2015, Lasher et al. 2017).

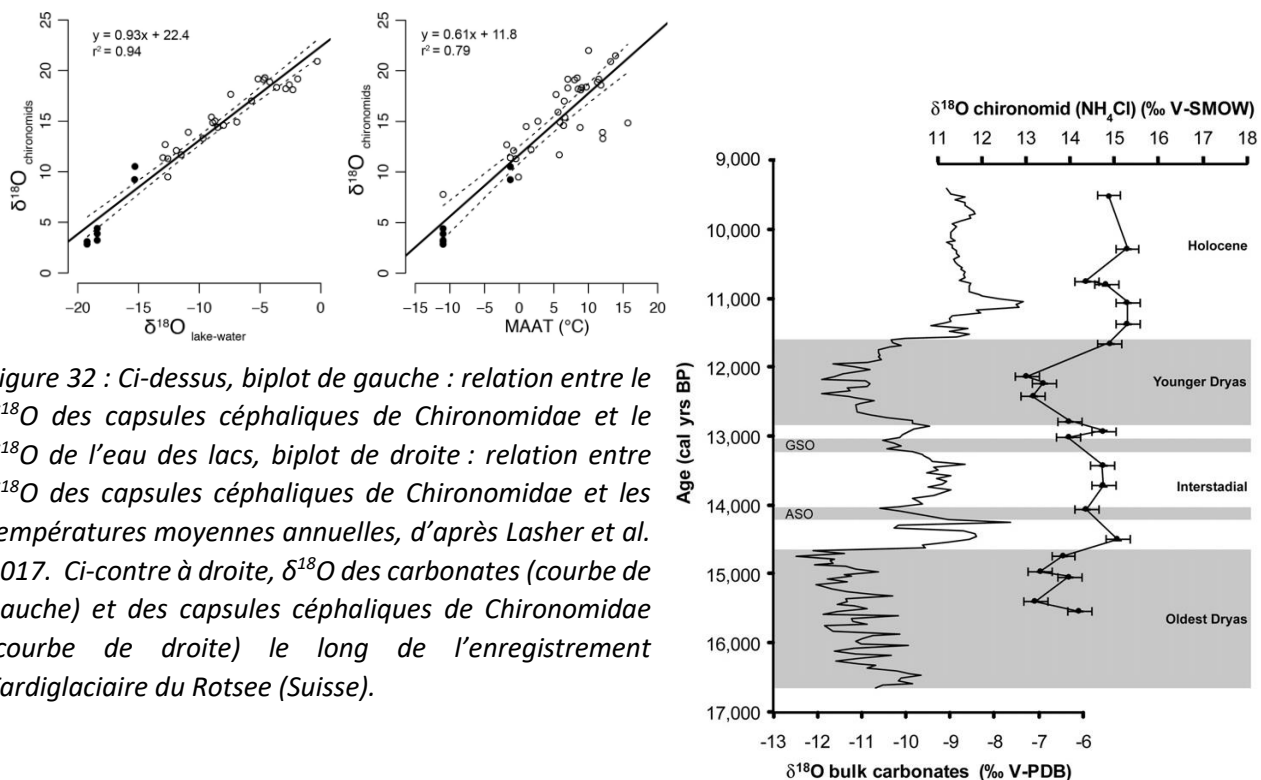


Figure 32 : Ci-dessus, biplot de gauche : relation entre le $\delta^{18}\text{O}$ des capsules céphaliques de Chironomidae et le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau des lacs, biplot de droite : relation entre $\delta^{18}\text{O}$ des capsules céphaliques de Chironomidae et les températures moyennes annuelles, d'après Lasher et al. 2017. Ci-contre à droite, $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates (courbe de gauche) et des capsules céphaliques de Chironomidae (courbe de droite) le long de l'enregistrement Tardiglaciaire du Rotsee (Suisse).

Enfin, à partir de l'étude du même marqueur (les restes fossiles de Chironomidae), il serait ainsi possible d'une part de reconstituer les températures estivales d'après les changements de composition taxonomique et parallèlement de reconstituer les températures annuelles d'après les changements de signature isotopique de l'oxygène de la chitine.

III.B Les changements du climat au cours du dernier cycle climatique : approche intégrée et à haute résolution

Mon objectif premier est ici de prolonger dans les dimensions temporelles et spatiales les reconstitutions quantitatives déjà produites à partir des assemblages de Chironomidae en mettant à profit les améliorations et développements méthodologiques décrits dans la section précédente.

- Les reconstitutions pédoclimatiques obtenues pour les lacs du Lautrey et du Col d'Ech ont montré –si encore nécessaire- la pertinence des assemblages de Chironomidae comme outil de reconstitution de changements climatiques à une période charnière de notre histoire climatique, marquée par une variabilité complexe. Il s'agit donc maintenant de relever le défi d'une **reconstitution en continu pour le dernier cycle climatique, de l'Éémien au début de l'Holocène**. La séquence du Bergsee (Forêt Noire) est d'ores et déjà identifiée comme LA séquence prometteuse pour atteindre cet objectif.

▪ L'étude des enregistrements lacustres de hautes latitudes et/ou altitudes (Lac d'Anterne dans les Alpes, Lac d'Igaliko au Groenland) ont également mis en exergue la sensibilité des assemblages de Chironomidae aux variations des températures des 2000 dernières années et ce malgré la faible amplitude des changements. Une des conditions reste cependant que l'influence de l'homme soit la plus faible possible afin de ne pas interférer sur la réponse des Chironomidae aux changements du climat. Il s'agit donc en travaillant sur des **nouveaux sites sélectionnés** avec soin (en bon état écologique et fonctionnel actuel) de **reconstituer à haute résolution la dynamique climatique Holocène**. Je porterai mes efforts de recherches vers plusieurs zones géographiques : **les Alpes**, dans la droite ligne des premiers travaux réalisés sur le Lac d'Anterne et de Cheserys, **les Pyrénées** où plusieurs sites sont déjà en cours d'étude (Lacs de Port Biehl, Aratille), **la zone boréale et subarctique**, du Golfe du Saint Laurent à la côte Est du Groenland.

III.B.1 Le Bergsee : un enregistrement unique de l'Éémien au Tardiglaciaire

▪ Le site et ses potentialités

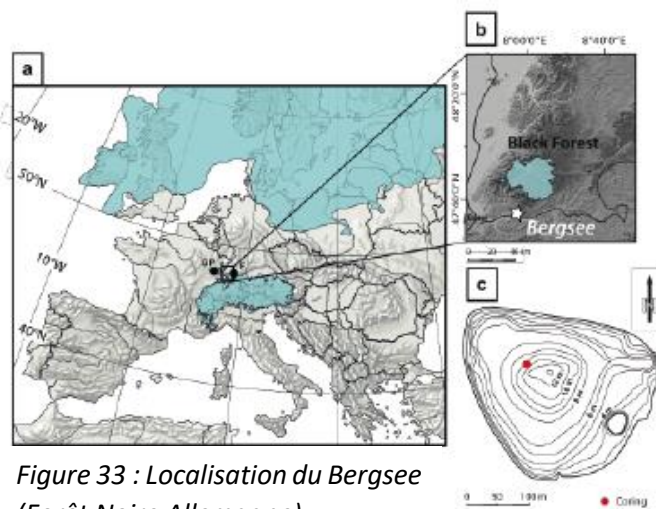


Figure 33 : Localisation du Bergsee (Forêt Noire Allemagne)

Lors de mes travaux de thèse, j'ai eu l'opportunité d'étudier les assemblages de Chironomidae d'une carotte sédimentaire de la Forêt Noire : **le lac du Bergsee** (Fig. 33, Becker et al. 2006). Les premiers résultats produits ont suggéré les potentialités intéressantes de cette première séquence puisqu'elle semblait documenter en continu les 32 derniers millénaires et qu'elle était riche en restes subfossiles de Chironomidae et en pollen (Becker et al. 2006). Compte tenu de ces premiers éléments de chronologie, de la reconnaissance géophysique du

remplissage sédimentaire qui laisse envisager plus de 60 m d'accumulation, de la position géographique du site apparemment situé au-delà de la zone d'extension maximale du glacier Würmien, les sédiments du Bergsee ont très probablement enregistré et archivé **la variabilité climatique et environnementale en continu au cours des 120 000 dernières années** soit l'intégralité du **dernier cycle climatique**.

Nous avons donc identifié ce site comme une priorité majeure d'étude étant donné la rareté de tels enregistrements à cette latitude. En 2013, dans le cadre du projet Last-Gate (financement OSU Theta de Besançon), une nouvelle mission de carottage a été organisée sur le Bergsee avec le soutien de la plateforme de forage du C2FN. Ce sont finalement deux carottes jumelles de 28 et 24,5 mètres qui ont été extraites des accumulations sédimentaires de la petite cuvette lacustre. La «master core» construite à partir des deux carottes jumelles sur la base des profils de susceptibilité magnétique mesurée à haute résolution **couvre plus de 45 000 ans d'après les 13 datations radiocarbone** déjà réalisées (Fig. 34).

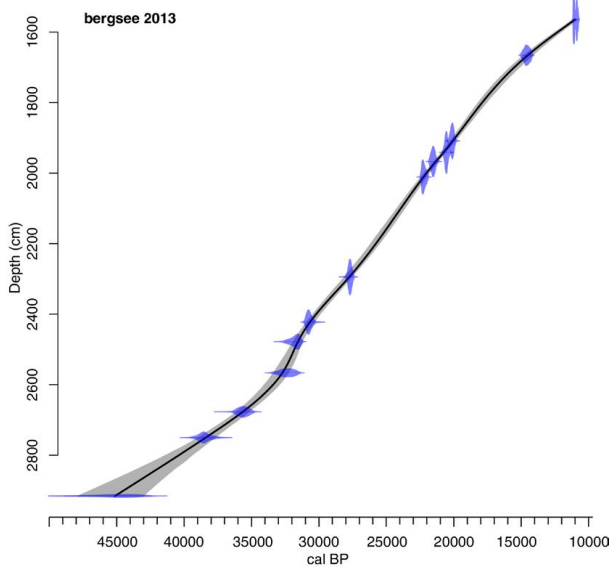


Figure 34 : Modèle âge/profondeur de la séquence sédimentaire du Bergsee prélevée en 2013 réalisé grâce au 13 dates radiocarbones déjà disponibles.

Grâce à une corrélation stratigraphique précise des profils de susceptibilité magnétique des carottes de 2013 et de 2006, les nouvelles dates radiocarbones ont complété les rares dates disponibles pour la carotte 2006. De plus, l'amélioration de la fonction de transfert des Chironomidae depuis 2006 (extension du référentiel actuel, nouveaux taxons pris en compte, Heiri et al. 2011) permet aujourd'hui de reconstituer quantitativement les températures à partir des assemblages de Chironomidae étudiés le long de la carotte 2006 (Fig. 35). Il s'agit de la première reconstitution continue des températures pour la fenêtre 12-37 ka cal BP en Europe Tempérée. La concordance entre cet enregistrement continental et le NGRIP est particulièrement remarquable.

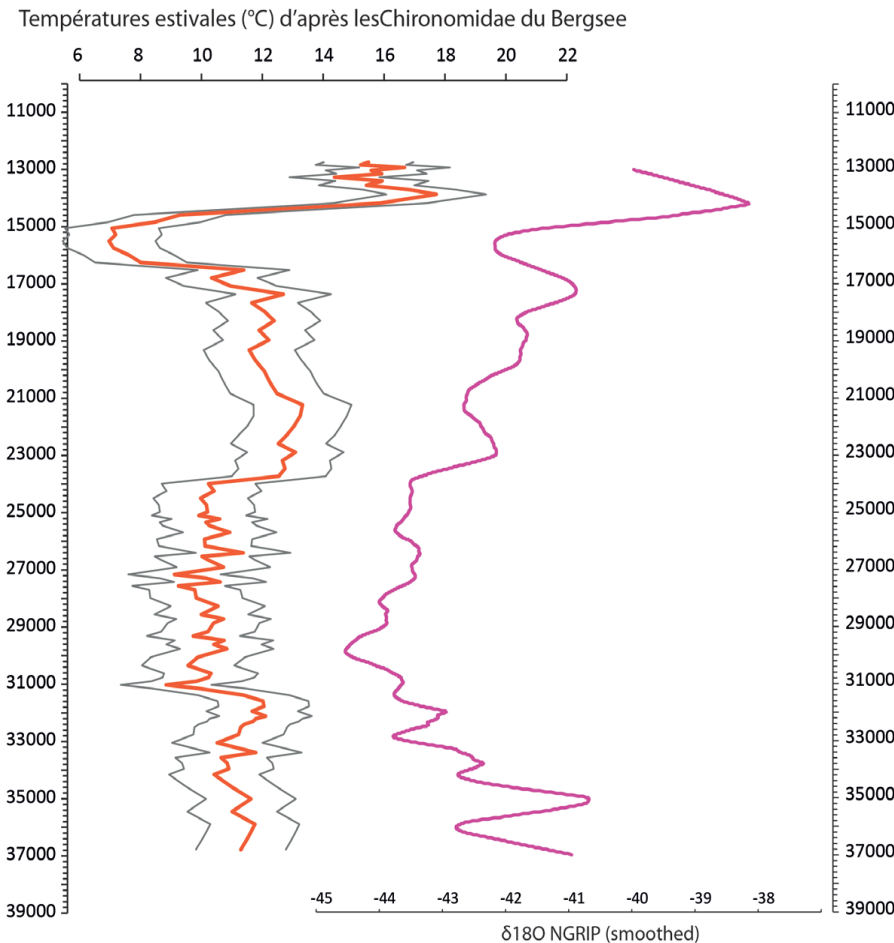


Figure 35 : Reconstitutions des températures de juillet réalisées à partir des assemblages de Chironomidae de la séquence du Bergsee pour l'intervalle 37000-15000 cal. BP et δ18O du NGRIP.

L'analyse à haute résolution du contenu pollinique des échantillons de cette nouvelle carotte (Fig. 36, thèse de Fanny Duprat-Oualid, Duprat-Oualid et al. 2017) a démontré la sensibilité de la végétation à la variabilité climatique millénaire (Interstades de Dansgaard-Oeschger, événements d'Heinrich).

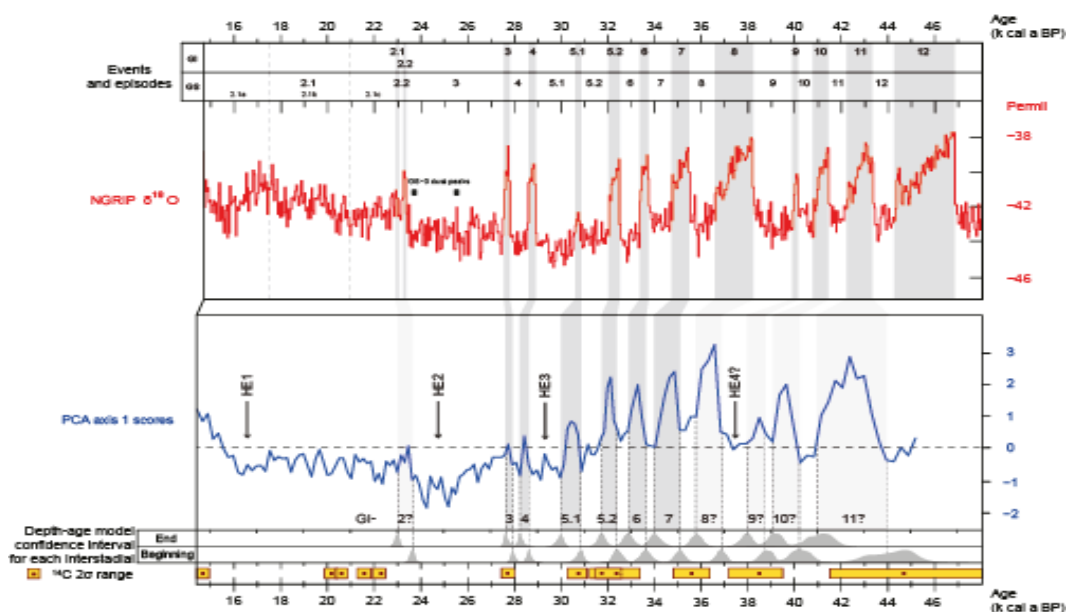


Figure 36 : Changements de composition des assemblages polliniques synthétisés par les scores des échantillons le long de l'axe 1 d'une ACP (en bleu). Les phases marquées par le développement de la végétation arborée (valeur élevée de la courbe bleue) sont chronologiquement corrélées aux Interstades de Dansgaard-Oeschger (bandes grises) mis en évidence dans le NGRIP, de l'Interstade 11 à l'interstade 2.

▪ Le projet Circe

Dans la suite de ces travaux préliminaires qui ont définitivement confirmé **l'intérêt majeur de cette séquence**, nous avons initié et soumis le projet CIRCE (Climate change and ecosystem Response during the last climatic Cycle (130 000 yrs) in Central Europe). Le premier défi que compte relever le projet CIRCE en partenariat avec le C2FN, est le prélèvement **d'une carotte longue (estimée à 60 m)** dans le petit lac du Bergsee. Le projet mettra ensuite à profit une **approche interdisciplinaire intégrée**, fruit d'une collaboration étroite entre plusieurs laboratoires français et allemands. CIRCE vise deux objectifs majeurs:

Objectif 1 : Reconstituer la variabilité climatique haute et basse fréquence pour les 120 000 dernières années en Europe de l'Ouest.

La valeur ajoutée du projet réside dans la **combinaison de différents proxies paléoclimatiques** complémentaires pour reconstituer les variations de températures (estivales et hivernales) et des précipitations. L'objectif est de confronter qualitativement (événements, fréquence, synchronie) et quantitativement (amplitude de variation) ces nouvelles reconstitutions aux archives glaciaires ainsi qu'aux enregistrements continus européens (la Grande Pile, les Echets). Un des enjeux sera de **caractériser les changements du climat associés aux événements de Dansgaard-Oeschger** en mettant en œuvre une **haute résolution analytique** (1 échantillon = 100 ans en continu). Un objectif ambitieux est également de **fournir un cadre climatique « local » pour l'évolution des**

environnements et des sociétés souvent comparées, par défaut, avec les archives glaciaires distantes (ex Gamble et al. 2004).

Les températures estivales seront reconstituées d'après les assemblages de Chironomidae. Avec comme enjeu d'évaluer les changements de saisonnalité (Ampel et al. 2010), il s'agit ensuite d'enrichir ces premières reconstitutions par une quantification des autres paramètres du climat (MAT, MTCO, Pmm) en développant des reconstitutions croisées pollen/Chironomidae et en utilisant des approches innovantes ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) dans des composés spécifiques d'origine aquatique et terrestre.

Dans le cadre d'une collaboration avec Oliver Heiri, les reconstitutions paléoclimatiques obtenues au lac du Bergsee et sur d'autres sites voisins (ex Fűramoos, 47° 59'N/ 9° 53'E, 662 m a.s.l.) seront combinées afin d'aboutir à une courbe synthétique des températures couvrant les 130000 dernières années soit le dernier cycle climatique.

Objectif 2 : Caractériser la réponse des biogéosystèmes continentaux à ces changements climatiques.

Il s'agit de (i) caractériser **les réponses de la végétation** aux changements climatiques reconstitués par des approches indépendantes, (ii) évaluer les **interrelations complexes entre le climat, la végétation et le régime de perturbations** (avec un focus sur le feu), et (iii) **quantifier la dynamique détritique** en réponse aux variations climatiques et de couvert végétal.

Grâce à la fenêtre chronologique couverte par le projet, et à la haute résolution des analyses, le projet CIRCE prévoit une analyse comparée de la réponse des biogéosystèmes à plusieurs échelles temporelles (i) **aux échelles séculaires et millénaires** : comparaison stades-Interstades-événements de Heinrich, (ii) **à l'échelle plurimillénaire** : comparaison Glaciaire-Interglaciaire et Interglaciaire Holocène-Interglaciaire Eemien.

Finalement, le projet CIRCE nous permettra de disposer d'un enregistrement de la variabilité climatique et environnementale du dernier cycle climatique. Une attention particulière sera portée au traitement et stockage de cette archive sédimentaire unique en vue de sa réutilisation probable. En effet, outre les objectifs initiaux définis dans le cadre du projet, la séquence du Bergsee sera potentiellement le support pour d'autres thématiques connexes de recherche, comme par exemple l'étude du cycle du carbone et de la méthanotrophie ou de la dynamique de biodiversité perçue à travers l'étude de l'ADN dégradé, soit globalement ou plus spécifiquement en ciblant des groupes taxonomiques d'intérêts particuliers.

Le Bergsee est un site unique en Europe tempérée : ses accumulations sédimentaires documentent très probablement le dernier cycle climatique en continu. Les premiers résultats (pollen, Chironomidae, géochimie) obtenus sur une séquence « courte » de 28m et couvrant 45 000 ans confirment les potentialités de l'enregistrement du Bergsee. C'est donc un site majeur vers lequel se tournent nos priorités. Le projet ambitionne de fédérer une équipe internationale pour reconstituer à haute résolution les changements du climat et les réponses des bio-géosystèmes de l'Eémien à l'Holocène.

III.B.2 Holocène : Alpes, Pyrénées, Groenland, et Canada

▪ Les zones de montagne

Les zones de montagnes (Alpes et Pyrénées) sont riches d'un grand nombre de lacs constituant autant d'enregistrements potentiels de la variabilité climatique holocène. Contrairement aux idées trop souvent reçues, nombre de lacs d'altitude sont profondément impactés et modifiés dans leur fonctionnement par des activités humaines souvent insoupçonnées au premier regard, pastoralisme et/ou gestion piscicole en tête.

Qu'elles soient récentes ou plus anciennes, ces perturbations modifient les états d'équilibre et « troublent » le signal climatique, souvent ténu, contenu par exemple dans la dynamique temporelle des assemblages de Chironomidae. Ainsi, le choix des lacs revêt une importance toute particulière pour la reconstitution pertinente des changements du climat.

La stratégie que je propose de mettre en œuvre s'appuie sur **une sélection des cibles d'étude d'après une évaluation préliminaire de l'état écologique et fonctionnel actuel** des écosystèmes lacustres. Compte tenu du fait que les marqueurs paleoclimatiques sur lesquels s'appuie mon projet sont les assemblages de Chironomidae, l'outil de diagnose le plus indiqué est **l'Indice Biologique Lacustre (IBL, Verneaux et al. 2004)** qui considère les densités, la richesse et la distribution bathymétrique actuelles des macro-invertébrés benthiques (dont font partie les Chironomidae).

Une synthèse des résultats antérieurs montrent très explicitement **une corrélation entre l'état actuel des systèmes** (sous-indice Df d'efficacité fonctionnel de l'IBL) **et le turn-over dans la composition des assemblages de Chironomidae** le long de chaque enregistrement (fig. 37). En d'autres termes, les lacs identifiés comme actuellement perturbés (lacs « dysfonctionnels ») sont effectivement marqués par des changements fonctionnels importants, le plus fréquemment récents et d'origine anthropique.

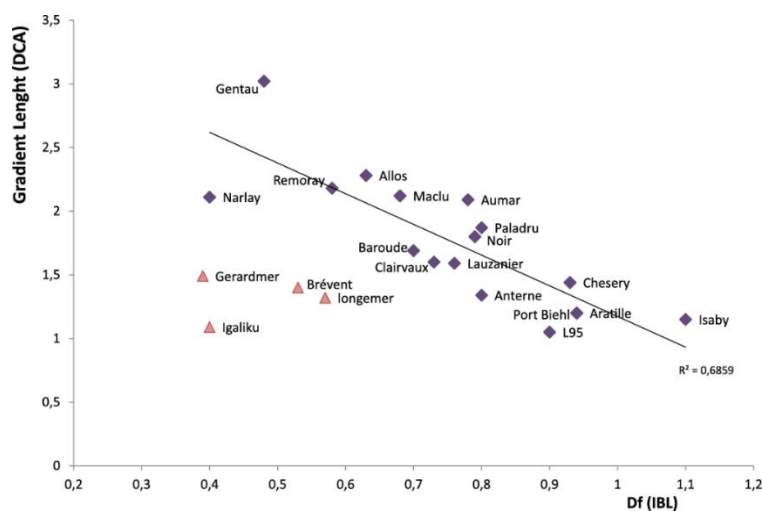


Figure 37 : Relation entre le turn-over global dans les stratigraphies des assemblages de Chironomidae (Gradient Length d'une DCA) et l'indice de fonctionnalité actuelle des lacs (Sous indice Df de l'IBL). Les lacs dysfonctionnels (Df faibles) sont caractérisés par des changements passés importants de composition des assemblages de Chironomidae (« Gradient Length » élevé). Certains lacs « naturellement » dysfonctionnels échappent à cette relation (ex Brévent ou Gerardmer).

Il s'agit donc *in fine* de **cibler les lacs les moins perturbés actuellement** (lacs qualifiés de « eufonctionnels » par l'IBL, $Df > 0.9$) **pour les reconstitutions paléoclimatiques**. C'est souvent les lacs où il n'y a pas de bouleversement majeur et brutal dans la stratigraphie des assemblages de Chironomidae.

A court terme, **dans les Alpes**, deux sites prioritaires ont été identifiés et notamment le lac du Grand Doménon ($Df = 1,05$) et de Crop ($Df = 0,98$) au sud de la Chaîne de Belledonne. **Dans les Pyrénées**, plusieurs sites ont été reconnus suite aux travaux réalisés dans le cadre des projets REOCEPAL 1 et 2 et coordonnés par Didier Galop : il s'agit des lacs de Port-Biehl ($Df = 0,94$) et d'Aratille ($Df = 0,94$).

La chronologie de ces enregistrements est déjà disponible et s'appuie pour l'instant sur une série de dates radiocarbone qui seront complétées par l'analyse des radio-éléments ^{210}Pb et ^{137}Cs (en cours). L'analyse des Chironomidae dans une première série d'échantillons confirme l'intérêt porté à ces séquences.

▪ **La zone boréale et subarctique**



Pour les zones des hautes latitudes, **divers secteurs géographiques au Canada et au Groenland seront prospectés** (fig. 38) dans le cadre du projet ANR Interarctic qui débute en 2018 et dans celui de la thèse d'Augustin Feussom (cotutelle France Canada, Olivier Blarquès Laurent Millet) : la côte Est du Groenland (n°4), la côte Ouest du Groenland avec un transect nord-sud (N° 1, 2, 3), la Baie d'Hudson (n°6 et 7), la côte du Labrador (n° 5) et la Baie du Saint-Laurent (n°8).

Figure 38 : carte de localisation des différentes zones d'études prévues dans le projet ANR InterArctic et la thèse d'Augustin Feussom (Univ. de Montréal).

A titre d'exemple, dans le Sud-ouest du Groenland, l'objectif est à court terme, de compléter la première approche fructueuse tentée sur le lac d'Igaliku au Sud-Ouest du Groenland. Deux nouveaux enregistrements sédimentaires ont été prélevés dans la zone colonisée par les Vikings (« établissements de l'Est »). Contrairement au lac d'Igaliko, ces deux lacs ne semblent pas impactés par la « révolution verte » toujours en cours dans cette partie du Groenland et se prêtent donc à la reconstitution des changements du climat y compris pour la période contemporaine. Il s'agit donc du « Lac 95 » situé en face de Narsaq (Belle et al. 2017) et du « lac 350 » situé au-dessus du lac d'Igaliku (fig. 39)



Figure 39 : carte de localisation des sites d'études, Lac 95, Lac 350 et Lac d'Igaliku dans le Sud-Ouest du Groenland.

Documenter la variabilité climatique Holocène est une des priorités de mon projet. J'ai choisi de focaliser mes recherches futures sur deux zones d'intérêt : les zones de montagnes alpines et pyrénéennes et les zones boréales et sub-arctiques. Dans chacune de ces zones, plusieurs sites d'étude ont déjà été ciblés, certains ayant fait l'objet d'analyses préliminaires. A plus long terme, ce corpus sera complété par l'étude de nouveaux sites, notamment vosgiens où je prévois de mettre en œuvre l'étude des isotopes de l'oxygène comme marqueurs paleoclimatiques.

III.C Trajectoire fonctionnelle des lacs, facteurs de stress et impacts

Les travaux que j'ai menés ou auxquels j'ai participé ainsi que la littérature internationale convergent pour reconnaître **l'eutrophisation accélérée** et la **gestion des communautés pisciaires** comme deux des principaux facteurs anthropiques responsables de l'altération du fonctionnement des écosystèmes lacustres et de la remise en cause des services écosystémiques associés. Mon projet, avec comme objectif ultime de répondre aux enjeux cruciaux de gestion et de maintien durables des services liés à ces systèmes, s'intéresse plus particulièrement **aux effets de ces deux facteurs de stress**.

III.C.1 Une stratégie interdisciplinaire multi-échelles

Cet axe de mon projet de recherches s'appuie sur le développement d'une stratégie interdisciplinaire qui prévoit, au-delà de la classique juxtaposition de marqueurs étudiés en parallèle, l'intégration des données issues de disciplines complémentaires dans une démarche holistique et multi-échelles spatiales, temporelles et fonctionnelles. Il profite finalement de la valeur ajoutée d'un aller-retour constant entre observation actuelle et retro-observation des socio-écosystèmes.

▪ **L'observation des systèmes**

Sur les systèmes actuels, la **combinaison des différentes disciplines naturalistes** (études directes des communautés de macro-invertébrés, de phyto et zooplancton), **chimiques** (chimie de l'eau, analyses des isotopes stables du carbone, de ceux de l'oxygène, des molécules lipidiques) et **de biologie moléculaire** (ADN environnemental par qPCR, metabarcoding) vise à décrire les réseaux trophiques et comprendre les transferts d'énergie et de carbone aux différentes échelles, de celle du système dans son ensemble, à celle du compartiment (pélagique, benthique) et de la station (habitat littoraux, profonds ..). Ces disciplines de la limnologie (interdisciplinaire par essence) sont croisées avec les données de la **Géographie Physique et Humaine** (climat, géomorphologie, occupation des sols, pratiques agropastorales) afin **d'identifier** puis de **hiérarchiser** les **facteurs de contrôle** et finalement **quantifier leurs impacts respectifs et/ou combinés** actuels. Les Zones Ateliers, les Observatoires Hommes Milieux et plus généralement tous les dispositifs d'observation des socio-écosystèmes sur le long terme (ex SOERE « OLA », « Réseau lacs sentinelles » ...) sont particulièrement propices à ces approches intégrées. C'est sur ce réseau de recherches partenariales impliquant aussi les gestionnaires d'espaces protégés et des milieux aquatiques que je prévois d'appuyer mon projet. A l'exemple du lac de Remoray, site d'observation de la ZAAJ (Zone Atelier Arc Jurassien), ces dispositifs nous permettent de disposer de véritables sites ateliers à ciel ouvert.

▪ **La calibration des marqueurs sédimentaires**

Ce **volet « observatoire »** donne également l'opportunité de **calibrer les marqueurs sédimentaires**. Il s'agit par exemple de comprendre la représentativité des assemblages subfossiles par rapport aux communautés vivantes (production de restes, transports, dépôts, conservation différentielle), de comprendre les processus diagénétiques sur les signatures géochimiques (ex. isotopes, composés

lipidiques), de développer de nouveaux proxis sédimentaires marqueurs des conditions mésologiques (ex. pigments photosynthétiques comme proxis du niveau trophique).

▪ **Exploiter le caractère intégrateur du sédiment dans les dimensions spatiales et temporelles**

L'étude de ces marqueurs sédimentaires, intégrateurs de l'état et du fonctionnement des écosystèmes lacustres et de leur bassin-versant permet alors de prolonger les données d'observation dans les dimensions spatiales et temporelles afin de couvrir de larges gradients de caractéristiques typologiques, ainsi que de nature et d'amplitude de perturbations.

○ **Dimension spatiale** : L'approche « sédiment » permet ainsi de **multiplier facilement les sites d'études**. L'analyse de descripteurs intégrateurs dans les sédiments de surface, même si elle ne permet pas une caractérisation aussi fine des processus que l'observation directe, présente l'avantage d'une mise en œuvre plus rapide et moins coûteuse en temps de travail. Par exemple, l'étude des assemblages subfossiles de Chironomidae dans les sédiments de surface de la zone profonde d'un lac ne prend que 2 jours contre plusieurs semaines si on se focalise sur les communautés vivantes. C'est ce principe qui est mis en avant dans le cadre du projet « top-bottom » financé par Suez-Environnement. Ce sont plus de 60 lacs dont les sédiments de surface sont analysés et comparés aux caractéristiques typologiques, aux conditions climatiques et à l'occupation des sols des bassins-versants. Un de mes objectifs est donc d'augmenter le nombre et la diversité des lacs étudiés en travaillant dans d'autres zones géographiques européennes soit directement soit par le jeu d'un réseau de collaborations internationales.

○ **Dimension temporelle** : L'analyse de ces mêmes descripteurs le long de carottes sédimentaires permet de prolonger rétrospectivement les données d'observation et de replacer l'état actuel des systèmes dans leurs dynamiques sous contrôles naturels et/ou anthropiques. A l'instar de ce que nous développons pour l'observation des systèmes actuels, l'intégration de différentes disciplines complémentaires est un des piliers de **cette approche de type retro-observatoire**. L'étude des indicateurs paléolimnologiques classiques sont couplés à celle de marqueurs innovants (analyse des isotopes stables, ADN dégradé, traceurs moléculaires ...) et à l'analyse critique des archives historiques : iconographie, textes et relevés. Cette approche diachronique sera développée sur des systèmes choisis en fonction de leurs contextes typologiques et humains. L'approche « top-bottom » actuellement mise en œuvre sur une grande diversité de lacs nous permet d'ores et déjà d'identifier des cibles d'études prioritaires. Pour chacun des lacs de l'étude un écart à la référence (ECR) est déterminé par la différence entre une situation actuelle (échantillon « top » des carottes) et une situation de référence (échantillon « bottom » des carottes, datés de la fin du 19^{ème}). Mes investigations porteront donc prioritairement sur des lacs marqués par des ECR importants, avec comme objectifs de reconstituer leur trajectoire écologique (facteurs de contrôle et réponses) entre l'état initial et l'état dégradé actuel. Un des objectifs sera évidemment de considérer une fenêtre chronologique plus longue et de travailler au moins sur le dernier millénaire.

III.C.2 Trajectoire des systèmes : facteurs de perturbations et état des systèmes

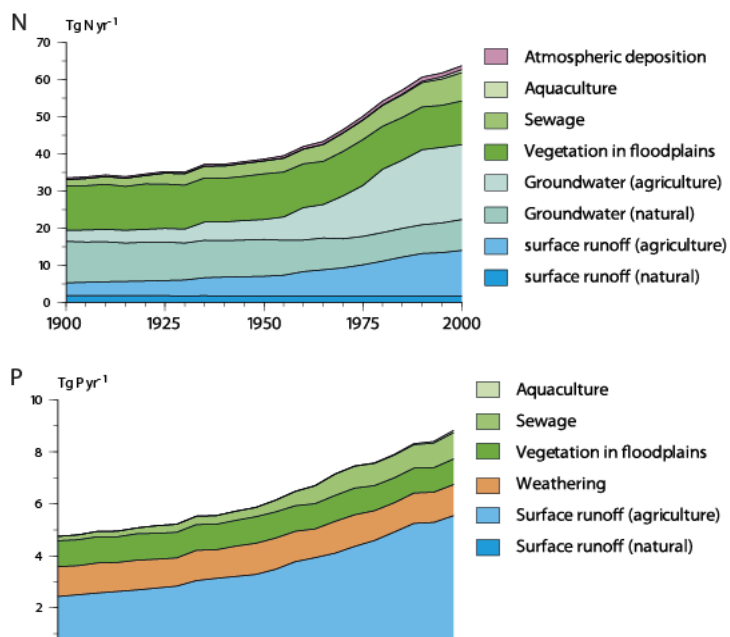
Cette **stratégie interdisciplinaire combinant approche synchronique et diachronique** sera mise en œuvre pour reconstituer la **trajectoire fonctionnelle des écosystèmes lacustres**. Il s'agit donc de mettre en relation des variables d'état des écosystèmes (dans le cadre de mon projet : les assemblages de Chironomidae et leur signature isotopique du carbone) et des facteurs de forçages à différentes échelles d'action, de l'échelle locale (ex eutrophisation) à l'échelle globale (climat). Les enjeux sont multiples :

- Identifier le **type de trajectoire** suivi par les écosystèmes lacustres. Les trajectoires qu'elles soient linéaires ou impliquant des points de bascules sont-elles facilement réversibles ou existe-il des évolutions plus complexes mettant en jeu des mécanismes de résilience et d'hysteresis ?
- **Reconnaitre des marqueurs d'alertes** (« Early Warnings » : augmentation de la variance, de l'autocorrélation, vitesse de retour à l'état initial ... ex Scheffer et al. 2012) précédant les bascules dans un état stable « non désiré ».
- Evaluer le **poids des perturbations anciennes sur la vulnérabilité** des systèmes actuels. Une de nos hypothèses est que les perturbations anciennes d'échelles locales (principalement l'eutrophisation et la gestion piscicole) ont diminué la résilience des écosystèmes lacustres augmentant ainsi la probabilité de bascules fonctionnelles sous l'effet du changement climatique en cours ou futur.

J'ai choisi d'axer mon projet sur les deux facteurs de perturbations principaux responsables de changements fonctionnels dans les lacs : l'eutrophisation et la gestion piscicole. Cette priorisation n'exclut pourtant pas l'influence d'autres facteurs ponctuellement importants comme **les substances toxiques**. De plus, la perspective de ces travaux est de déterminer comment les caractéristiques intrinsèques (typologie) et l'histoire des systèmes conditionnent leurs vulnérabilités face au changement climatique en cours et futur. Cette **composante climatique** est donc implicitement **au cœur de mon projet**.

▪ **L'Eutrophisation et l'anoxie des lacs**

La synthèse du rapport d'une Expertise Scientifique Collective (ESCo) confiée par les ministères en charge de l'environnement et de l'agriculture et l'Agence française pour la biodiversité au CNRS, à l'Ifremer, à l'INRA et à Irstea a récemment dressé un bilan des causes et des effets de l'eutrophisation dans les milieux aquatiques (Pinay et al. 2017). L'eutrophisation **représente des enjeux majeurs de recherches fondamentales, appliquées et de gestion** tant les mécanismes d'action des facteurs de perturbation sont complexes (situations de stress multiples et combinés), leurs effets sur le fonctionnement des systèmes, la biodiversité et les services écosystémiques associés sont importants, et les restaurations sont coûteuses et sans succès garanti. L'eutrophisation anthropique ou eutrophisation accélérée est le syndrome (ensemble des effets directs et indirects) d'un écosystème aquatique associé à la surproduction de matières organiques induit par des **apports anthropiques en phosphore et en azote** (Pinay et al. 2017).



Les deux sources principales de ces nutriments sont d'une part les rejets d'eaux usées liées à l'augmentation et les concentrations de populations et d'autre part l'agriculture notamment par l'utilisation d'engrais de synthèse pour l'azote et fossiles pour le phosphore. A l'échelle mondiale, l'agriculture représente la plus forte contribution en azote et phosphore pour les eaux de surface avec une **augmentation considérable au cours du 20^{ème} siècle** et particulièrement depuis les années 50 (fig. 40).

Figure 40 : Les sources de rejets d'azote (N) et de phosphore (P) dans les eaux de surface à l'échelle globale au cours du 20^{ème} siècle. D'après Beusen et al. 2016.

Les effets néfastes de l'eutrophisation sont multiples, ils incluent la **perte de biodiversité et la remise en cause de service écosystémiques** (approvisionnement en eau potable, en poisson, régulations du cycle du carbone, valeur récréatives ...).

Le **développement de l'hypoxie ou de l'anoxie** dans la zone profonde aphotique des lacs est une des conséquences directe de l'augmentation de la production primaire et du changement qualitatif des communautés de producteurs primaires (ex apparition et dominance des cyanobactéries). La dégradation de ces conditions d'oxygénation hypolimnétiques jouent en retour un rôle déterminant sur la perte de biodiversité (ex macro-invertébrés benthiques), les couplages trophiques entre compartiments benthiques et pélagiques, l'activation du métabolisme du méthane.



A court terme, un site d'étude privilégié -le Lac de Nantua (jura)- a été identifié a l'issue de la diagnose sédimentaire rapide menée dans le cadre du projet « top-bottom ». Le site apparait très prometteur pour explorer la trajectoire d'un système eutrophisé puis re-oligotrophisé avec un retour supposé à des conditions initiales y compris dans le compartiment benthique (contrairement aux lacs d'Annecy et du Bourget). L'approche paleolimnologique projetée (master 2 prévu en 2018) peut être finalement assimilée à une expérimentation réalisée *a posteriori*. L'approche rétrospective est facilitée par la sédimentation varvée (fig. 41) et donc un contrôle chronologique très précis de l'enregistrement.

Figure 41 : détail des varves dans les sédiments du lac de Nantua

▪ **Un focus sur l'impact de la gestion piscicole**

Longtemps sous-estimée et peu étudiée, **l'introduction de poisson** est aujourd'hui identifiée comme une **menace majeure pesant sur la biodiversité et le fonctionnement des lacs d'altitude**. Les salmonidés sont les poissons les plus fréquemment introduits dans les lacs de haute altitude, le plus souvent originellement apiscicoles. Opportunistes, ils se développent aux dépens de proies terrestres, benthiques (macro-invertébrés) et planctoniques (zooplancton). Par ses **effets directs et indirects, la prédation sélective** exercée par les poissons sur les proies les plus visibles (taille, couleur) est à l'origine des **impacts potentiels** de l'introduction de ces espèces **sur les communautés et le fonctionnement trophique** des lacs d'altitude (fig. 42).

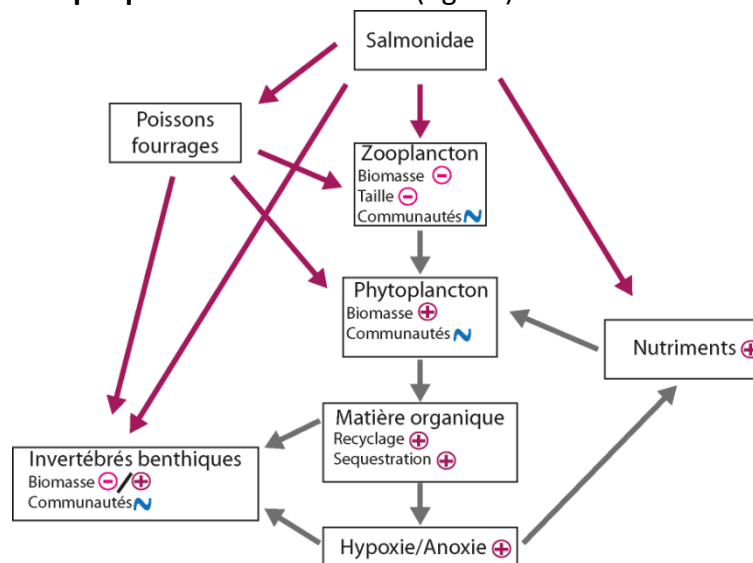


Figure 42 : Représentation schématique des effets directs (en violets) et indirects (en gris) de l'introduction de Salmonidae et de poissons fourrages dans les lacs d'altitude. Le changement de la structure en taille et de la composition des communautés zooplanctoniques et de macro-invertébrés benthiques est une des conséquences souvent mises en évidence de l'introduction de poisson. En favorisant les espèces zooplanctoniques de petites tailles, brouteurs de phytoplancton moins compétitifs que les espèces de grandes tailles, l'introduction de poisson peut entraîner par effet cascade une altération des capacités de transferts d'énergie et de matière dans les réseaux trophiques pélagiques, et conduire indirectement à une accumulation plus forte de matière organique (MO) phytoplanctonique résiduelle dans le compartiment sédimentaire. Cet excès de MO sédimentaire est alors recyclée par les organismes hétérotrophes euryèces dont la biomasse peut augmenter (oligochètes, certaines espèces de Chironomidae) tandis que les taxons oxybiontes régressent ou disparaissent parallèlement à la mise en place de conditions hypoxiques. Le poisson peut également modifier le cycle des nutriments azote et phosphore et stimuler la production algale par régénération des nutriments d'origines terrestres et benthiques. Ainsi, en fonction de la résilience des systèmes et de leur état initial, l'introduction de poisson peut constituer l'événement déclencheur d'une bascule vers un état dysfonctionnel stable avec ses conséquences potentiellement néfastes sur les biens et services associés.

Plusieurs sites d'étude sont déjà identifiés et font l'objet de premières analyses :

- **Dans les Alpes**, Les lacs du Mont Coua (alt. 2672 m) et Verdet (alt. 2727 m) situés des massifs de la Vanoise et des Alpes Grées. Pour ces deux lacs, l'histoire de la gestion halieutique y est parfaitement connue et seul le Cristivomer a été introduit dans ces lacs originellement apiscicoles (Mont Coua : 1963 ; Verdet : 1990-1993).

- **Dans les Pyrénées**, les projets en cours FISH et FISH2 coordonnés par D Galop et financés par le Labex DRIIHM, Le Parc National des Pyrénées et l’OHM « Haut Vicdessos », articulent paleolimnologie et recherches historiques (histoire et politique des alevinages, influence des fédérations de pêche, poids économique local des piscicultures).

Par une approche combinant l’observation des systèmes actuels avec la retro-observation des évolutions passées, je souhaite reconstituer les trajectoires fonctionnelles des systèmes lacustres au cours de l’Holocène avec une attention particulière portée sur les évolutions récentes dans le contexte de l’Anthropocène. Il s’agit pour moi de qualifier et de quantifier les réponses des lacs aux effets « bottom-up », ascendants, de l’eutrophisation et top-down, descendants, de l’introduction de poisson et de la gestion piscicole. Comprendre les ressorts de ces facteurs de stress et leurs effets directs et indirects (cascades trophiques, retro-actions) et sur les services rendus implique une nécessaire interdisciplinarité qui intègre les approches naturalistes, d’écologie trophique, sédimentologiques et historiques.

III.C.3 séquestration du carbone et méthanotrophie dans les lacs carbonatés

Ce volet de mon projet vise à explorer **les conséquences de ces changements** de conditions physico-chimiques (ex anoxie) et trophiques en plaçant des focus particuliers sur (i) la **séquestration du carbone** (ii) l’activation et le développement de **la méthanotrophie**.

▪ **La séquestration du carbone dans les lacs**

Bien que les lacs ne représentent approximativement que 3.7% de la surface des continents, ces écosystèmes jouent un **rôle important dans la régulation du cycle global du carbone** (Tranvik et al. 2009). Le bilan carbone des lacs de la zone tempérée est cependant encore peu documenté.

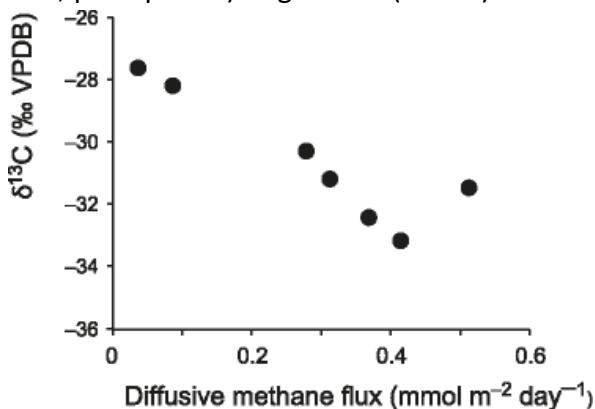
Les résultats de travaux menés récemment en Europe suggèrent cependant une relation étroite entre la séquestration de carbone organique dans les lacs et les surface agricoles des bassins versants (Kastowski et al. 2011). D’un point de vue diachronique, le développement des activités agro-pastorales à partir du néolithique semble avoir favorisé la séquestration de carbone organique (Katowski et al. 2011). Dans le contexte de l’Anthropocène, la séquestration de carbone organique est encore accélérée par l’eutrophisation anthropique des masses d’eau (Anderson et al. 2013). **Ces études suggèrent donc une intensification de la fonction puit de carbone des lacs européens sous l’influence anthropique.**

Le projet que je souhaite développer ambitionne de contribuer à enrichir cette problématique qui représente en enjeu fort dans la perspective du changement climatique. Il s’agit **d’estimer la fonction puit de carbone** des lacs carbonatés et de ses facteurs de contrôle. Les questions associées auxquelles nous prévoyons de répondre sont :

- Peut-on reconstituer quantitativement l’évolution des flux de carbone organique et inorganique séquestrés par les lacs par une approche sédimentologique ?
- Existe-t-il une relation entre séquestration du carbone dans les lacs et occupation des sols des bassins versants ?
- Quels sont les mécanismes impliqués dans cette relation ?

▪ Activation et développement de la méthanotrophie

Les résultats obtenus notamment dans le cadre des thèses de Victor Frossard et de Simon Belle montrent que **les activités humaines locales** (eutrophisation, introduction de poisson) entraînent des changements de conditions physico-chimiques (anoxie) et trophiques (abondance de matière organique) **favorables à l'activation du métabolisme du méthane dans les lacs** (production, transfert, et émission probable). Cette problématique reste une des priorités de mon projet de recherche. Il s'agit donc de mettre en évidence le transfert du carbone du méthane dans les réseaux trophiques aquatiques benthiques (Chironomidae) et pélagiques (Daphnies) et en comprendre les facteurs de contrôle aux différentes échelles : stationnelles (conditions physico-chimiques, quantité et qualité de la matière organique, influence des macrophytes ...), bassin versant (occupation des sols, pratiques ...) et globales (climat).



Un des objectifs méthodologiques associés sera d'identifier des marqueurs sédimentaires, proxys directs ou indirects de l'émission de méthane par les lacs à l'image des premiers travaux de Van Hardenbroek et al. en 2012 (fig. 43). Il sera ainsi possible de reconstituer les dynamiques passées de l'émission de méthane et de les confronter à leurs facteurs de forçages potentiels.

Figure 43 : relation entre la signature isotopique du carbone de la chitine des Chironomidae et les flux de méthane à la surface du lac. D'après Van Hardenbroek (2012).

Ce volet ambitionne de contribuer à l'évaluation du rôle des systèmes lacustres dans le cycle du carbone global. L'accent sera mis sur les lacs carbonatés où les fonctions source/puit de carbone sont encore imparfaitement connues. Le but est d'abord de quantifier la séquestration du carbone organique et inorganique dans le compartiment sédimentaire en réponse aux changements de fonctionnement trophique et aux facteurs environnementaux et climatiques. L'objectif est ensuite de comprendre comment ces changements influent sur la production de méthane, son transfert dans les réseaux trophiques et son émission par les systèmes lacustres.

III.C.4 Répondre aux enjeux de gestion

Pour clore cette partie dédiée à mon projet, il m'est apparu important d'insister sur **le rôle et la contribution que peut et doit apporter la recherche à des problématiques appliqués liées à la gestion des systèmes aquatiques**. Cette conviction a motivé mon investissement personnel et professionnel en direction des acteurs de la gestion des lacs. Un des objectifs que j'ai décidé de me fixer est le transfert des connaissances et de l'expertise acquise par la recherche fondamentale pour répondre aux questions concrètes des gestionnaires. Cette volonté s'est déjà matérialisée par plusieurs projets de recherches partenariaux avec les Agence de l'Eau (Rhin Meuse, Rhône Méditerranée Corse), la Réserve Nationale de Remoray, Le conservatoire des Espaces Naturels de

Rhône-Alpes ainsi que ma participation active au « Réseau Lacs Sentinelles » qui fédère chercheurs et gestionnaires des lacs d'altitudes alpines.

Les gestionnaires en charge de écosystèmes lacustres sont aujourd'hui confrontés à des situations complexes où les perturbations locales et globales se combinent et rendent difficile la proposition de programmes de protection et de restauration efficaces des lacs pourtant indispensables à l'atteinte du bon état écologique des masses d'eau comme par exemple imposée par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE, 2000/60).

L'expérience acquise au cours de mon parcours de chercheur en paleolimnologie me permet de contribuer à **répondre aux attentes des acteurs de la gestion**:

- En proposant **des outils pertinents (et rapides) de diagnose** de l'état écologique des lacs.

En France, une des démarches scientifiques envisagée pour qualifier l'état écologique des lacs consiste en l'établissement de types lacustres sur la base de caractéristiques géo-morphologiques (Cirulaire DCE 2005/11) au sein desquels des lacs peu ou non anthropisés sont recherchés afin d'établir un état écologique de référence auquel sera comparé l'état écologique actuel de tout lac du même type. La disparition de systèmes lacustres non anthropisés invalide cette démarche typologique (recherche de lacs références pour les différents types lacustres) pourtant prévue dans la Directive Cadre Européenne.

L'approche paleolimnologique permet de s'affranchir du caractère artificiel d'une typologie **pour définir un état de référence** qui soit **spécifique à chaque système lacustre**. La fin du 19^{ème} siècle est marquée par des conditions climatiques proches de celles connues actuellement (après la fin du Petit Age Glaciaire) et correspond à une période de moins forte anthropisation des écosystèmes. C'est cette période qui peut être choisie comme «référence» en suivant les conclusions de Bennion et al. (2004). **L'état écologique d'un lac peut donc être déterminé par son écart à la référence (ECR), calculé dans notre proposition comme la différence entre l'état actuel des biomarqueurs sédimentaires** (ex assemblage de Chironomidae dans l'échantillon de surface d'une carotte) **et leur état à la période de «référence »** (assemblages de Chironomidae dans les sédiments datant de la fin du 19^{ème} siècle, fig. 44).

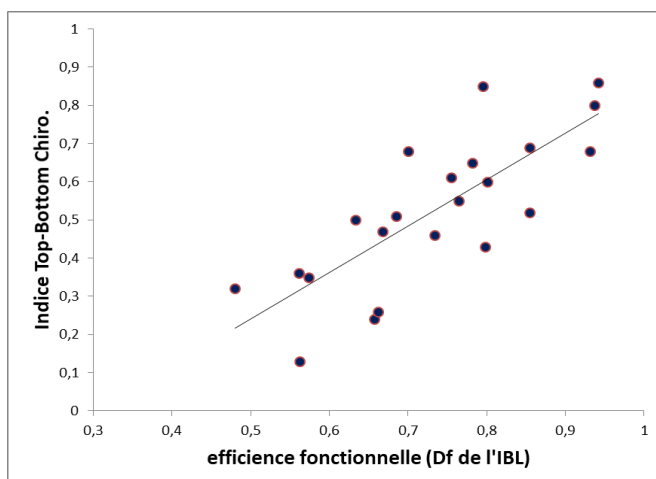


Figure 44 : Relation entre l'écart à la référence (ECR) déterminé d'après la différence de composition des assemblages de Chironomidae entre la période actuelle et la fin du 19^{ème} siècle (Indice Top-bottom chiro.) et l'efficacité fonctionnelle évaluée par une méthode de diagnose actuelle standard (Df de l'IBL). On observe une bonne concordance entre la diagnose dérivée de l'approche paleolimnologique (simple et rapide) et celle dérivée du protocole standard (longue et plus complexe).

Cette approche dite « top-bottom » présente en outre l'avantage d'être rapide et peu coûteuse. Elle reste une méthode de diagnose rapide qui permet d'identifier les systèmes dysfonctionnels sur lesquels concentrer ensuite plus de moyens d'études et d'analyses.

- En **identifiant et hiérarchisant les facteurs de perturbations**.

En cas de dysfonctionnement avéré, un des réflexes naturels des gestionnaires est certes d'évoquer la possibilité de l'impact anthropique local mais surtout de penser aux effets supposés du changement climatique en cours, cette éventualité remettant en cause la possibilité d'améliorer les choses en agissant au niveau local.

L'approche paleolimologique diachronique, en palliant l'absence de suivi sur le long terme, permet **d'identifier et de hiérarchiser les facteurs de perturbations** responsables des changements majeurs de fonctionnement et de **la perte des services écosystémiques associés**. L'expérience acquise au cours des dernières années sur les lacs jurassiens, alpins et vosgiens nous a montré la pertinence de cette approche et son utilité pour la gestion (participation au plan de gestion du Lac de Remoray, étude diagnostic sur les lacs de Gerardmer, Longemer et Retournermer). Ces résultats font également la preuve que les activités anthropiques locales sont le plus souvent à l'origine des dysfonctionnements mis en évidence. Si ce constat peut de prime abord paraître négatif, il montre que les gestionnaires ont les cartes en main pour restaurer les systèmes en agissant localement, par exemple sur les pratiques agro-pastorales ou l'efficacité du traitement des eaux vannes. Finalement, l'enjeu est sans doute l'améliorer la fonctionnalité des systèmes et de favoriser leur biodiversité afin d'augmenter leur résilience face aux changements futurs du climat.

Le transfert, en direction des acteurs de la gestion, des connaissances et de l'expertise acquises par la recherche fondamentale sur le fonctionnement des lacs, leur histoire et leurs réponses aux différents facteurs de perturbation est une des finalités de mon projet qui me tient à cœur. Je pense notamment contribuer à l'évaluation rapide de l'état écologique des lacs et à la l'identification des actions de protection, mitigation et de restauration nécessaires au maintien durable de la fonctionnalité des écosystèmes lacustres.

Références

Les citations en vert dans le texte renvoient à la liste de publications présentées avec le Curriculum Vitae.

-Anderson, N.J., Dietz, R.D., Engstrom, D.R. (2013) Land-use change, not climate, controls organic carbon burial in lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280 (1769), art. no. 20131278

-Armitage, P.D., Cranston, P.S. & Pinder, L.C.V. (1995) *The Chironomidae. The biology and ecology of non-biting midges*. Published by Chapman et Hall, London, U.K.

-Arneborg, J., Heinemeir, J., Lynnerup, N., Nielsen, H.L., Rud, N., Sveinbjornsdottir, A.E. (1999) Change of diet of the Greenland Vikings determined from stable carbon isotope analysis and C-14 dating of their bones. *Radiocarbon* 41, 157–168.

-Beusen, A.H.W., Bouwman, A.F., Van Beek, L.P.H., Mogollón, J.M., Middelburg, J.J. (2016) Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum *Biogeosciences*, 13 (8), pp. 2441-2451.

-Björck, S., Walker, M.J.C., Cwynar, L., Johnsen, S.J., Knudsen, K-L., Lowe, J.J., Wohlfarth, B. & Intimate Members (1998): An event stratigraphy for the Last Termination in the North Atlantic region based on the Greenland Ice Core record: a proposal by the INTIMATE group. *J. Quaternary Sci.* 13: 283-292.

-Brodersen, K.P., Pedersen, O., Lindegaard, C., Hamburger, K. (2004) Chironomids (Diptera) and oxy-regulatory capacity: An experimental approach to paleolimnological interpretation *Limnology and Oceanography*, 49 (5), pp. 1549-1559.

-Brodersen, K.P., Pedersen, O., Walker, I.R., Jensen, M.T. (2008) Respiration of midges (Diptera; Chironomidae) in British Columbian lakes: Oxy-regulation, temperature and their role as palaeo-indicators. *Freshwater Biology*, 53 (3), pp. 593-602.

-Brodin, Y.W. (1986) The postglacial history of Lake Flarken, southern Sweden, interpreted from subfossil insect remains. *Int. Revue Ges. Hydrobiol.* 71(3): 371-432.

-Brooks, S.J., Langdon, P.G., Heiri, O., (2007) *The identification and use of Palaeartic Chironomidae larvae in palaeoecology*. Quaternary Research Association Technical Guide, London.

-Brundin, L. (1949) Chironomiden und andere Bodentiere der Südschwedischen Urgebirgsseen. *Rep. Inst. Freshwat. Res. Drottningholm* 30: 1-914.

-Cohen, A.S. (2003) *Paleolimnology : The history and Evolution of lake Systems*. Oxford University Press, 500p.

-Delaygue, G., Bard, E. (2011) An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium. *Climate Dynamics*, 36 (11-12), pp. 2201-2218.

-DeNiro, M.J., Epstein, S. (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42 (5), pp. 495-506.

-Eggermont, H., Heiri, O., (2011) The chironomid-temperature relationship: expression in nature and palaeoenvironmental implications. *Biological Reviews*. doi:10.1111/j.1469-185X.2011.00206.x.

-Ferrington Jr., L.C. (2008) Global diversity of non-biting midges (Chironomidae; Insecta-Diptera) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595 (1), 447-455.

-Guiot, J., Corona, C., ESCARSEL members (2010) Growing season temperatures in Europe and climate forcings over the past 1400 years. *PLoS One* 5:e9972. doi:10.1371/journal.pone.0009972

-Haines, E.B. (1976) Relation between the stable carbon isotope composition of fiddler crabs, plants, and soils in a salt marsh. *Limnology and Oceanography*, 21 (6), pp. 880-883.

-Hann, B.J., Warner, B.G., Warwick, W.F. (1992) Aquatic invertebrates and climate change: a comment on Walker et al. (1991). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 1274-1276.

-Heinis, F.H. & Crommentuijn, T. (1992) Behavioural responses to changing oxygen concentrations of deposit feeding chironomid larvae (Diptera) of littoral and profundal habitats. *Arch. Hydrobiol.* 124: 173-185.

-Heinis F. & Davids C. (1993) Factors governing the spatial and temporal distribution of chironomid larvae in the Maarsseveen lakes with special emphasis on the role of oxygen conditions. *Neth. J. aquat. Ecol.* 27: 21-34.

-Heiri, O., Brooks, S., Birks, H.J.B., Lotter, A.F., (2011) A 274-lake calibration dataset and inference model for chironomid-based summer temperature reconstruction in Europe. *Quaternary Science Reviews* 30, 3445–3456.

-Heiri, O., Wooller, M.J., van Hardenbroek, M., Wang, Y.V. (2012) Stable isotopes in chitinous fossils of aquatic invertebrates. *PAGES news* 17 (3), 100-102.

-Heiri, O., Brooks, S.J., Renssen, H., Bedford, A., Hazekamp, M., Ilyashuk, B., Jeffers, E.S., Lang, B., Kirilova, E., Kuiper, S., Millet, L., Samartin, S., Toth, M., Verbruggen, F., Watson, J.E., Van Asch, N., Lammertsma, E., Amon, L., Birks, H.H., Birks, H.J.B., Mortensen, M.F., Hoek, W.Z., Magyari, E., Munõz Sobrino, C., Seppä, H., Tinner, W., Tonkov, S., Veski, S., Lotter, A.F. (2014) Validation of climate model-inferred regional temperature change for late-glacial Europe. *Nature Communications*, 5, art. no. 4914.

-Int Panis, L., Goddeeris, B. & Verheyen, R.F. (1996): On the spatial distribution and respiratory environment of benthic macroinvertebrates in ponds. *Hydrobiologia* 319: 131-136.

lovino, A.J. (1975) Extant chironomid larval populations and their representativeness and nature of their remains in lake sediments. Ph-D. thesis, University of Indiana, 59p.

-Isarin, R. (1997) The climate in the northwestern during the Younger Dryas: a comparison of multiproxy climate reconstructions with simulation experiments. Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, Netherlands geographical Studies, 229, 150 p.

-Kastowski, M., Hinderer, M., Vecsei, A. (2011) Long-term carbon burial in European lakes: Analysis and estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 25 (3), art. no. GB3019, .

-Kaufman, D.S., Schneider, D.P., McKay, N.P., Ammann, C.M., Bradley, R.S., Briffa, K.R., Miller, G.H., Otto-Bliesner, B.L., Overpeck, J.T., Vinther, B.M., Arctic Lakes 2k Project Members, Abbott, M., Axford, Y., Bird, B., Birks, H.J.B., Bjune, A.E., Briner, J., Cook, T., Chipman, M., Francus, P., Gajewski, K., Geirsdottir, A., Hu, F.S., Kutchno, B., Lamoureux, S., Loso, M., MacDonald, G., Peros, M., Porinchu, D., Schiff, C., Seppa, H., Thomas, E., (2009) Recent warming reverses long-term Arctic cooling. *Science* 325, 1236–1239. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1173983>.

-Larocque-Tobler, I., Grosjean, M., Heiri, O., Trachsel, M., Kamenik, C. (2010) Thousand years of climate change reconstructed from chironomid subfossils preserved in varved lake Silvaplana, Engadine, Switzerland. *Quaternary Science Reviews*, 29 (15-16), pp. 1940-1949.

-Lasher, G.E., Axford, Y., McFarlin, J.M., Kelly, M.A., Osterberg, E.C., Berkelhammer, M.B. (2017) Holocene temperatures and isotopes of precipitation in Northwest Greenland recorded in lacustrine organic materials *Quaternary Science Reviews*, 170, 45-55.

-Lotter, A.F., Eicher, U., Birks, H.J.B. & Siegenthaler, U. (1992) Lateglacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments. *J. Quaternary Sci.* 7: 187-204.

-Lotter, A.F., Birks, H.J.B., Hofmann, W. & Marchetto, A. (1997) Modern diatom, Cladocera, chironomid and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate. *J. Paleolimnol.* 18: 395-420.

-Mayr, C., Laprida, C., Lücke, A., Martín, R.S., Massaferró, J., Ramón-Mercado, J., Wissel, H. (2015) Oxygen isotope ratios of chironomids, aquatic macrophytes and ostracods for lake-water isotopic reconstructions - Results of a calibration study in Patagonia. *Journal of Hydrology*, 529 (P2), pp. 600-607.

-Mock, C.J. (2007) Overview of Paleoclimatology. In: *The Encyclopedia of Quaternary Science* (S. Elias, Chief Editor), Elsevier Press, U.K., 1867-1872.

-Pinay, G., Gascuel, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Le Moal, M., Levain, A., Etrillard, C., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P. (2017) L'eutrophisation : manifestations, causes,

conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 144 pages.

-Olander, H., Korhola, A. & Blom, T. (1997) Surface sediment Chironomidae (Insecta: Diptera) distributions along an ecotonal transect in subarctic Fennoscandia: developing a tool for palaeotemperature reconstructions. *J. Paleolimnol.* 18: 45-59.

-Quinlan, R., Smol, J.P. & Hall, R.I. (1998) Quantitative inference of past hypolimnetic anoxia in south-central Ontario lakes using fossil midges (Diptera: Chironomidae). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 587-596.

-Rasmussen, S.O., Bigler, M., Blockley, S.P., Blunier, T., Buchardt, S.L., Clausen, H.B., Cvijanovic, I., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S.J., Fischer, H., Gkinis, V., Guillevic, M., Hoek, W.Z., Lowe, J.J., Pedro, J.B., Popp, T., Seierstad, I.K., Steffensen, J.P., Svensson, A.M., Vallelonga, P., Vinther, B.M., Walker, M.J.C., Wheatley, J.J., Winstrup, M. (2014) A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: Refining and extending the INTIMATE event stratigraphy *Quaternary Science Reviews*, 106, 14-28.

-Rieradevall, M. & Prat, N. (1991) Benthic fauna of Lake Banyoles. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 24:1020-1023.

-Saether, O.A. (1979) Chironomid communities as water quality indicators. *Holarct. Ecol.* 2: 65-74.

-Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., Walker, B. (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413 (6856), 591-596.

-Schilder, J., Van Hardenbroek, M., Bodelier, P., Kirilova, E.P., Leuenberger, M., Lotter, A.F., Heiri, O. (2017) Trophic state changes can affect the importance of methane-derived carbon in aquatic food webs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284 (1857), art. no. 20170278.

-Schmah, A. (1993) Variation among fossil chironomid assemblages in surficial sediments of Bodensee-Untersee (SW-Germany): implications for paleolimnological interpretation. *J. Paleolimnol.* 9(2): 99-108.

-Smol, J.P. (1991) Are we building enough bridges between paleolimnology and aquatic ecology? *Hydrobiologia*, 214 (1), 201-206.

-Smol, J.P (2008) *Pollution of Lakes and Rivers A Paleoenvironmental Perspective*, 2nd Edition, Blackwell Publishing, 383 p.

-Tranvik, L.J., Downing, J.A., Cotner, J.B., Loiselle, S.A., Striegl, R.G., Ballatore, T.J., Dillon, P., Finlay, K., Fortino, K., Knoll, L.B., Kortelainen, P.L., Kutser, T., Larsen, S., Laurion, I., Leech, D.M., Leigh

McCallister, S., McKnight, D.M., Melack, J.M., Overholt, E., Porter, J.A., Prairie, Y., Renwick, W.H., Roland, F., Sherman, B.S., Schindler, D.W., Sobek, S., Tremblay, A., Vanni, M.J., Verschoor, A.M., Von Wachenfeldt, E., Weyhenmeyer, G.A. (2009) Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54, 2298-2314.

-van Hardenbroek, M., Lotter, A., Bastviken, D., Duc, N., Heiri, O. (2012) Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ of chironomid remains and methane flux in Swedish lakes *Freshwater Biology*, 57 (1), pp. 166-177.

-van Hardenbroek, M., Heiri, O., Parmentier, F.J.W., Bastviken, D., Ilyashuk, B.P., Wiklund, J.A., Hall, R.I., Lotter, A.F. (2013) Evidence for past variations in methane availability in a Siberian thermokarst lake based on $\delta^{13}\text{C}$ of chitinous invertebrate remains *Quaternary Science Reviews*, 66, pp. 74-84.

-Verbruggen, F., Heiri, O., Reichert, G.J., Blaga, C., Lotter, A.F. (2011) Stable oxygen isotopes in chironomid and cladoceran remains as indicators for lake-water $\delta^{18}\text{O}$ *Limnology and Oceanography*, 56 (6), 2071-2079.

-Verneaux, V. & Aleya, L. (1998) Bathymetric distributions of chironomid communities in ten French lakes: implications on lake classification. *Arch. Hydrobiol.* 142: 209-228.

-Verneaux V, Verneaux J, Schmitt A et al (2004) The Lake Biotic Index (LBI): an applied method for assessing the biological quality of lakes using macrobenthos; the Lake Châlain (French Jura) as an example. *Ann Limnol Int J Lim* 40:1–9. doi:10.1051/limn/2004003

-Walker, M.J.C. (1995) Climatic changes in Europe during the last glacial/interglacial transition. *Quat. Inter.* 28: 63-76.

-Walker, I.R. & Mathewes, R.W. (1989) Chironomidae (Diptera) remains in surficial lake sediments from the Canadian Cordillera: analysis of the fauna across an altitudinal gradient. *J. Paleolimnol.* 2: 61-80.

-Walker, I.R., Smol, J.P., Engstrom, D.R., Birks, H.J.B. (1991a) An assessment of Chironomidae as quantitative indicators of past climatic change. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48: 975-987.

-Walker, I.R., Mott, R.J., Smol, J.P. (1991b) Allerød-Younger Dryas lake temperatures from midge fossils in Atlantic Canada. *Science*, 253 (5023), 1010-1012.

-Walker, I.R., Smol, J.P., Engstrom, D.R., Birks, H.J.B. (1992) Aquatic invertebrates, climate, scale, and statistical hypothesis testing: a response to Hann, Warner, and Warwick. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49, 1276-1280.

-Walter-Simonnet, A.-V. (2008) Impacts sédimentaires de la présence humaine et des variations climatiques. Exemples d'enregistrements lacustres, fluviaux et estuariens... Habilitation à Diriger les Recherches, Sciences de la Terre. Université de Franche-Comté.

-Wiederholm, T. (1980) Use of benthos in lake monitoring. *Journal Water Pollution Control Federation*, 52, 537-547.

-Wiederholm, T. (1983): Chironomidae of the Holarctic region. Keys and Diagnoses. Part 1. Larvae. *Ent. Scand. Suppl.* 19: 1-457.

-Wooller, M.J., Pohlman, J.W., Gaglioti, B.V., Langdon, P., Jones, M., Anthony, K.M.W., Becker, K.W., Hinrichs, K.-U., Elvert, M. (2012) Reconstruction of past methane availability in an Arctic Alaska wetland indicates climate influenced methane release during the past ~12,000 years *Journal of Paleolimnology*, 48 (1), pp. 27-42.

Animation et encadrement de la Recherche

La Zone Atelier Arc Jurassien

Labellisée en 2013 par l'Institut Écologie et Environnement du CNRS (INEE), La Zone Atelier Arc Jurassien (ZAAJ, <https://zaaj.univ-fcomte.fr/>) fédère et soutient un réseau multidisciplinaire de recherches partenariales conduites sur les interactions entre environnement, société et dynamique des socio-écosystèmes de moyenne montagne. Elle vise à consolider et à croiser les capacités des laboratoires participants pour approfondir l'étude du système régional constitué par l'Arc jurassien, à renforcer leur coopération avec les acteurs locaux, à pérenniser des sites observatoires à long terme écologie-environnement-société, la gestion des données qui en sont issues, et à valoriser les résultats obtenus par des méthodes de recherche s'appuyant sur ces sites et les problématiques issues de l'analyse d'un ensemble régional.

Je suis avec François Gillet, **chargé de la coordination d'un des 4 thèmes de la ZAAJ : «Ecosystèmes et environnement»**. Il vise à comprendre les réponses des systèmes écologiques régionaux aux changements locaux et globaux, notamment dans leurs racines historiques et leur développement futur sur le temps long, et à déterminer la vulnérabilité des biens et services associés.

Je suis également **responsable du dispositif d'observation «Lacs jurassiens»**. Ce dispositif comprend :

- Le monitoring physico-chimique et biologique de deux systèmes emblématiques des lacs du Jura (lac de Remoray, lac de Narlay), caractérisés par des particularités intrinsèques, une histoire et un contexte socio-économique et géographique différents.
- L'étude de l'état actuel (descripteurs intégrateurs) et de la trajectoire écologique passée d'un grand nombre de lacs couvrant un plus large gradient de situations (type fonctionnel, perturbations anthropiques, usages).

Mon implication dans l'animation scientifique de la Zone Atelier Arc Jurassien (participation au comité de pilotage, au conseil scientifique, animation du dispositif d'observation « Lacs jurassiens ») **m'a permis de développer un réseau et des projets de recherches centrés sur le fonctionnement écologique des lacs jurassiens:**

- **Le Lac de Remoray** est devenu **un site atelier**, sorte de laboratoire à ciel ouvert où le monitoring mis en place permet de développer des approches innovantes. Ce dispositif est développé dans le cadre d'un partenariat étroit avec la Réserve Nationale du Lac de Remoray (je suis membre du comité consultatif de gestion). Au niveau du Laboratoire Chrono-Environnement, ce site a été étudié dans le cadre de la thèse de Simon Belle et est un site pivot d'une prochaine thèse dont j'assurerai l'encadrement en tant qu'HDR. Il fédère une partie des activités de plusieurs chercheurs et enseignants-chercheurs du laboratoire. Au niveau national, le suivi physico-chimique opéré sur le lac est intégré au SOERE OLA (« Observatoire des Lacs », <https://www6.inra.fr/soere-ola>). Enfin, l'appel à projet annuel de la ZAAJ m'a permis de susciter de nouvelles collaborations sur ce lac : projet RYCARS sur la dynamique spatiale et temporelle des macrophytes (D Etienne et F Arthaud CARRETEL) et FONCOMIC sur la relation entre les communautés microbiennes et le cycle du méthane dans les sédiments (E. Lyautey CARRETEL).

- C'est également sous le label de la ZAAJ que j'ai engagé **le suivi et l'étude de nombreux lacs de l'Arc Jurassien**. En lien étroit avec le réseau « thermie des lacs » de l'AFB (Agence Française pour la Biodiversité) et en partenariat avec les acteurs locaux de la gestion (Parc Naturel Régional du Haut-Jura, Fédération de Pêche 39 et 25, Agence de l'Eau RMC, Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques du Haut-Doubs), je souhaite développer le suivi (température et oxygène) sur une série de lacs jurassiens (Lacs de Narlay, des Rousses, de l'Abbaye, de Saint Point, de Grand Maclu). Des projets ponctuels ont pu être menés sur un grand nombre de lacs et notamment une approche « top-bottom » (17 lacs) dans le cadre d'un AAP Suez-Environnement et d'un partenariat avec le Conservatoire des Espaces Naturels de Rhône-Alpes (sur 5 lacs du Bugey).

Coordination et participation à des projets de recherches

Suite à mon intégration à Chrono-Environnement, j'ai pu rapidement financer la recherche par la **réponse à des appels à projets**. J'ai donc **coordonné plusieurs projets collectifs de recherches** dont la liste est fournie dans mon CV joint avec ce rapport d'activités.

J'ai d'abord eu l'opportunité de répondre à des AAP de recherche au niveau « local » comme le Bonus Qualité Recherche de l'Université de Franche-Comté (14 keuros en 2010), l'AAP de l'OSU Théta de Besançon (9 keuros en 2013) ou l'AAP de la ZAAJ (4 keuros en 2014). J'ai également coordonné des projets financés par des AAP régionaux et nationaux : le projet RÉVEL (Réponse et Vulnérabilité des Ecosystèmes Lacustres de montagne aux changements globaux : Etats actuels et trajectoires écologiques passées, Région Franche-Comté, 2011-2013, 160 keuros), un projet Inter-Zone Atelier (Historique de la contamination au plomb, 2014, 11keuros), le projet « Tob-Bottom » (AAP « Agir pour la Ressource en Eau » de Suez-Environnement, 2015-2018, 34 keuros).

Par ailleurs, j'ai coordonné 3 projets partenariaux avec les gestionnaires des espaces protégés et des milieux aquatiques sur les lacs Vosgiens (Agence de l'Eau Rhin Meuse, 2014, 8keuros), les lacs du Bugey (CEN Rhône-Alpes, 3 keuros), le lac de Remoray (Agence de l'Eau, DREAL, 20 keuros).

J'ai également **participé activement à plusieurs projets ANR**, les projets PYGMALION (Coord. F Arnaud), IPER-RETRO (Coord. ME. Perga) et GREENLAND (Coord. V. Masson Delmotte).

Encadrement de thèses

J'ai co-encadré deux thèses :

- La thèse de Victor Frossard qui a constitué ma première expérience d'encadrement a débuté en 2009 et portait sur la « Réponse du réseau trophique benthique de 3 grands lacs périalpins aux perturbations anthropiques et aux changements climatiques au cours des 150 dernières années : une approche paleolimnologique ». Le financement du contrat doctoral a été acquis dans le cadre du projet ANR IPER-Retro. Victor Frossard a soutenu en mai 2013. Ce travail a été pour nous (Victor Frossard, Valérie Verneaux, Michel Magny et moi) l'occasion de mettre en œuvre une stratégie innovante à l'époque basée sur une approche paleolimnologique multi-carottes et multi-sites et l'étude de nouveaux indicateurs sédimentaires (la signature isotopique du carbone de la chitine des Chironomidae). 6 articles scientifiques ont été publiés dans des revues de rang A à partir des résultats acquis dans cette thèse. Victor Frossard après un CDD au Laboratoire GEODE de Toulouse dans le cadre du Projet Roecepal (coord. D. Galop) a été recruté en tant que Maître de Conférence à l'Université de Savoie en 2014.

- La thèse de Simon Belle a commencé en 2013. Financée par la Région Franche-Comté, elle a porté sur l'«Etat actuel et trajectoire écologique passée des lacs : état de référence et vulnérabilité face aux changements globaux». Cette thèse a prolongé le premier travail de V. Frossard en se focalisant sur les petits lacs de montagne (Jura, Vosges, Alpes) et en apportant un éclairage particulier sur la méthanotrophie dans ces systèmes. Elle a été l'occasion également d'aller plus loin dans les approches interdisciplinaires en combinant les approches taxonomiques, géochimiques, de biologie moléculaire ... dans les archives lacustres. Simon Belle a soutenu sa thèse en novembre 2015. 9 articles ont été publiés dans des revues de rang A à partir des résultats acquis dans cette thèse. Simon Belle est actuellement en contrat post-doctoral en Suede (Swedish University of Agricultural Sciences).

Réseaux nationaux et Internationaux

Mon intégration dans les réseaux nationaux et internationaux me permet de développer les approches interdisciplinaires et multi-sites à la base de mes activités de recherches. Elle m'offre la possibilité de monter des collaborations scientifiques et des projets de recherches avec des partenaires gestionnaires et des collègues chercheurs français et étrangers.

▪ Réseaux officiellement constitués

Je suis activement intégré dans plusieurs réseaux de recherches labellisés :

- Le réseau des zones ateliers (Inter ZA), qui donne notamment l'opportunité de travailler de façon transversale sur les socio-écosystèmes des différentes ZA qui le composent.
- Le Service d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement (SOERE) « Observatoire des Lacs » (OLA). Cette infrastructure dans laquelle est intégrée le suivi du Lac de Remoray a pour objectif de fournir des données scientifiques de qualité pour comprendre et *in fine* modéliser l'évolution de l'état et des fonctionnements écologiques de systèmes lacustres soumis simultanément à un changement des pressions d'anthropisation locale et climatique. Il réunit les 10 principaux laboratoires Français de recherche en limnologie et paleolimnologie. Il implique également des partenaires gestionnaires.
- Le « Réseau Lacs sentinelles » qui s'est structuré en groupement d'intérêt scientifique (GIS) en octobre 2013. L'Université de Franche-Comté est un des partenaires de ce GIS où chercheurs (10 laboratoires), gestionnaires d'espaces protégés (Parcs Nationaux Alpains) et gestionnaires des milieux aquatiques (AFB, Fédérations de Pêche, EDF ...) s'unissent pour renforcer l'échange, la connaissance et la recherche sur les lacs et permettre d'en améliorer la conservation et la gestion.

Cette participation implique ma participation régulière et active aux échanges scientifiques et techniques (et de gouvernance pour le réseau lacs sentinelles) organisés par ces différents réseaux : Workshops et conseil de groupement du « réseau lacs sentinelles », séminaires du SOERE OLA, colloques des Zones Ateliers ...

- Réseaux de collaboration scientifiques

Au niveau national, j'ai à partir d'un noyau de proches collaborateurs à Chrono-Environnement (Valérie Verneaux, Damien Rius, Michel Magny, Emilie Gauthier, Vincent Bichet, Hélène Masclaux, Carole Bégeot) développé un solide réseau de collaborations avec les laboratoires GEODE (Didier Galop), CARTEL (David Etienne, Isabelle Domaizon, Emilie Lyautey), EDYTEM (F. Arnaud, P Sabatier), ISEM (Adam Ali, Odile Peyron), et l'IMBE (E. Gandouin, F. Guiter) pour les principaux (c'est-à-dire que ces partenaires ont été impliqués dans des projets et/ou des articles communs).

Au niveau international, mes collaborations « historiques » avec Oliver Heiri (Université de Bern) et Steeve Brooks (National History Museum de Londres) ont été enrichies par des projets communs, initiés dans le contexte de la thèse de Simon Belle, avec Andrea Lami, Aldo Marchetto et Marina Manca de l'ISE (Institute of Ecosystem Study, Italie).

Par mon investissement dans l'animation de dispositifs de recherches partenariaux, la coordination de projets scientifiques, ma participation à plusieurs réseaux collaboratifs de recherches et de gestion des lacs, mes co-directions de thèse, j'ai acquis une expérience forte d'encadrement et de gestion de la Recherche. J'ai mis à profit cette expérience et le réseau de collaborations nationales et internationales pour développer la recherche interdisciplinaire et intégrant les dimensions spatiales, temporelles et humaines sur les lacs en tant que socio-écosystèmes.

Curriculum Vitae

Situation personnelle

Laurent MILLET

Né le 11/08/1974 à Besançon,

Chargé de Recherches 1ère classe, N° agent : 00025702

Adresse professionnelle et contacts :

Laboratoire Chrono-Environnement UMR 6249 U.F.R. Sciences et Techniques, 16 rte de Gray, 25 030
Besançon cedex

Tél : 03 81 66 65 43 (prof.), 03 81 57 55 06 (perso.) mail : laurent.millet@univ-fcomte.fr

Fonctions et expériences professionnelles

- Depuis le 1/09/2007 : **Chargé de Recherches**, Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249.
- Du 1/10/2006 au 31/12/2006 : **CDD Post-doc**, station archéologique de Charavines : «Réponse de la végétation et de l'écosystème lacustre de Paladru aux changements du climat et à l'impact anthropique au cours des deux mille dernières années».
- Du 1/10/2005 au 31/09/2006 : **CDD Post-doc CNRS**, EDYTEM UMR 5204 : «Archives continentales et reconstitutions des changements climatiques et anthropiques Holo-cènes dans les Alpes françaises».
- Du 1/04/2004 au 31/10/2004 **CDD vacataire de recherche**, IMEP, UMR 6116.
- Du 1/10/2000 au 31/09/2003 **Allocataire de recherche**, Chrono-Ecologie, UMR 6565.

Enseignements suivis et diplômes universitaires

- Octobre 2004 : **doctorat en Sciences de la Vie**, Université de Franche-Comté, UFR ST, Laboratoire de Chrono-Ecologie, UMR 6565, Besançon : « Les assemblages de Chironomidae, marqueurs des changements de l'environnement et du climat pendant le Pléniglaciaire et le Tardiglaciaire. Etude de trois séquences lacustres : Bergsee (Forêt Noire, Allemagne), Lautrey (Jura, France), Accessa (Toscane, Italie)».
- Septembre 2000 : **DEA : «Méthodologies et Techniques Nouvelles en Sciences Humaines et Sociales»**, Université de Franche-Comté, UFR Lettres.
- Septembre 1998 : **DESS «Eaux Continentales, Pollutions et Aménagements»**, Université de Franche-Comté, UFR ST.
- 1995-1997 : Licence et Maîtrise Biologie des Organismes et des Populations, Université de Franche-Comté, UFR ST.

Responsabilités et fonctions au sein du laboratoire Chrono-Environnement

- 2012-2013 : **Membre élu du Conseil de Laboratoire** (Collège Chercheurs/Enseignant-Chercheur).

- 2013-2016 : **Membre du Comité Scientifique** du Laboratoire.
- 2013-2016 : **Co-responsable du STAR** (Service Technique d'Assistance à la Recherche) de Chrono-Environnement.

Animation et encadrement de la recherche

Coordination de projets de Recherches

- 2010 : Réponse et vulnérabilité des hydrosystèmes aux changements climatiques et anthropiques au cours des 2 derniers millénaires.

Rôle : Responsable du projet

Source financement : BQR Université de Franche-Comté

Aide accordée : fonctionnement : 14 keuros

- 2011 à 2013 : RÉVEL: Réponse et Vulnérabilité des Ecosystèmes Lacustres de montagne aux changements globaux : Etats actuels et trajectoires écologiques passées.

Rôle : Responsable du projet

Source financement : Conseil Régional de Franche-Comté

Aide accordée : investissement 150 keuros, fonctionnement : 10 keuros

- 2013 à 2015 : Projet Last-GATE : Last Glacial Termination in Europe

Rôle : Responsable du projet

Source financement : SR OSU Théta + Région Franche-Comté

Aide accordée : fonctionnement : 9 keuros + 7 keuros

- 2014 : Historique de la contamination au plomb dans les Alpes, le Jura et les Vosges depuis 2000 ans : vers la définition d'un nouveau référentiel chrono-stratigraphique.

Rôle : Responsable du projet

Source financement : Inter Zones Ateliers CNRS

Aide accordée : fonctionnement : 11 keuros.

- 2014 : Diagnostic fonctionnel des systèmes lacustres de Gerardmer, Longemer et Retourne-mer : une approche combinée limnologie/paléolimnologie.

Rôle : Responsable du projet

Source financement : Agence de l'Eau Rhin Meuse

Aide accordée : 8 keuros

- 2015-2018 : Projet « Top-bottom » (Outils innovants pour la diagnose écologique et la gestion des lacs).

Rôle : Responsable du projet

Source financement : Suez Environnement programme Agir pour la ressource en Eau
Aide accordée : 34 keuros

- Participants des projets ANR : «Iper-Retro» (Coord. M Perga), «Pygmalion» (coord. F Arnaud) et «Greenland» (coord. V Masson Delmotte).

Zone Atelier Arc Jurassien

Coordination du Thème «Ecosystèmes et Environnements» (L.Millet - F. Gillet)

Coordination du site d'observation «Lacs jurassiens» (L. Millet – V. Verneaux)

<https://zaaj.univ-fcomte.fr/>

GIS Lacs sentinelles

Membre du Conseil de Groupement

Membre de la Commission de coordination Scientifique

Encadrements et co-encadrements d'étudiant

- 2009-2013 : Thèse de Victor Frossard.

Titre : «Réponse du réseau trophique benthique de 3 grands lacs périalpins aux perturbations an-thropiques et aux changements climatiques au cours des 150 dernières années : une approche paleolimnologique».

Financement : programme ANR IPER-RETRO

Début : septembre 2009. Soutenance : 22 mai 2013

Part d'encadrement assurée : 40 % (Valérie Verneaux : 40 %, et Michel Magny (HDR) : 20%).

Publications : 6 articles de rang A.

- 2013-2015 : Thèse de Simon Belle (2013-2015)

Titre : «Etat actuel et trajectoire écologique passée des lacs : état de référence et vulnérabilité face aux changements globaux.»

Financement : Région Franche-Comté

Début : Novembre 2013

Part d'encadrement assurée : 40 % (Valérie Verneaux : 40 %, et Michel Magny (HDR) : 20%).

Publications : 9 articles.

- Encadrements de Master 2 :

Virgile Baudrot (2009, Master ECOS)

Alexandra Laveau (2014, Master QUEST)

Pierre Salvi (2015, Master ECOS)

Emilie Boichard (2017, Master QUEST)

Samuel Lyonnet (2018, Master Ecomont)

Jury de Thèse et comité de sélection

- 17 décembre 2014 : soutenance de Thèse d'Assia Fernane,

Titre : « Reconstitution des fluctuations holocènes en relation avec les changements climatiques et l'antropisation sur les côtes bretonnes à partir de bio-indicateurs fossiles (chironomidés, pollen et foraminifères benthiques) »

Mention : Géosciences

Université de Bretagne Occidentale, Brest

Examineur

- 14 octobre 2016 : soutenance de Thèse de Rosine Cartier,

Titre : « Trajectoires des écosystèmes lacustres alpins depuis 13500 ans dans les Alpes méditerranéennes (massif du Mercantour, France) : entre forçage climatique et pression anthropique plurimillénaire. »

Mention : Sciences de l'Environnement

Université d'Aix Marseille

Examineur

- Mai 2014 : membre du Comité de sélection, poste de Maître de Conférence section 67

Profil : « écologie des réseaux trophiques et des communautés »

Université de Franche-Comté

Activités d'enseignement

- Jusqu'en 2016, Master ECOS (Environnement Contaminants Santé) :

Responsable de l'option ROSE (« Retro-Observatoire des Systèmes Ecologiques »).

Enseignements : 6 h CM et 1h TP

Membre du Comité de Pilotage du Master

- Depuis 2017, Master EDGE (Ecologie, Diagnostic et Gestion des Ecosystèmes)

Co-responsable du module SMT (Spécialisation Méthodologique et Technique)

Responsable de l'option « Paleo-écologie ».

Enseignements : 7 h CM, 12 h TD

Membre du Comité de Pilotage du Master

- Licence Pro MINA (Métiers du diagnostic, de la gestion et de la protection des milieux naturels, 2h CM

Publications

47 publications dans des revues internationales à comité de lecture,

H index 21 (Scopus).

4 articles dans des actes de colloques à comité de lecture

10 chapitres de livres et divers

62 communications dans des colloques

1- Revues internationales à comité de lecture

[47] Duprat-Oualid, F., Rius, D., Bégeot, C., Magny, M., **Millet, L.**, Wulf, S., Appelt, O. (2017) Vegetation response to abrupt climate changes in Western Europe from 45 to 14.7k cal a BP: the Bergsee lacustrine record (Black Forest, Germany). *Journal of Quaternary Science*, 32 (7), pp. 1008-1021.

[46] Belle, S., Rius, D., Bichet, V., Massa, C., Mavon, C., **Millet, L.** (2017) Combining limnology and paleolimnology to assess the influence of climate change on two lakes in Southern Greenland. *Polar Biology*, 40 (9), pp. 1707-1719.

[45] Belle, S., Verneaux, V., Mariet, A.-L., **Millet, L.** (2017) Impact of eutrophication on the carbon stable-isotopic baseline of benthic invertebrates in two deep soft-water lakes. *Freshwater Biology*, 62 (6), pp. 1105-1115.

[44] Capo, E., Debroas, D., Arnaud, F., Guillemot, T., Bichet, V., **Millet, L.**, Gauthier, E., Massa, C., Develle, A.-L., Pignol, C., Lejzerowicz, F., Domaizon, I. (2016) Long-term dynamics in microbial eukaryotes communities: a palaeolimnological view based on sedimentary DNA. *Molecular Ecology*, 25 (23), pp. 5925-5943.

[43] Belle, S., **Millet, L.**, Lami, A., Verneaux, V., Musazzi, S., Hossann, C., Magny, M. (2016) Increase in benthic trophic reliance on methane in 14 French lakes during the Anthropocene. *Freshwater Biology*, 61 (7), pp. 1105-1118.

[42] Doyen, E., Bégeot, C., Simonneau, A., **Millet, L.**, Chapron, E., Arnaud, F., Vannière, B. (2016) Land use development and environmental responses since the Neolithic around Lake Paladru in the French Pre-alps. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 7, pp. 48-59.

[41] Belle, S., **Millet, L.**, Verneaux, V., Lami, A., David, E., Murgia, L., Parent, C., Musazzi, S., Gauthier, E., Bichet, V., Magny, M. (2016) 20th century human pressures drive reductions in deepwater oxygen leading to losses of benthic methane-based food webs. *Quaternary Science Reviews*, 137, pp. 209-220.

- [40] Belle, S., Verneaux, V., **Millet**, L., Etienne, D., Lami, A., Musazzi, S., Reyss, J-L., Magny, M., (2016) Climate and human land-use as a driver of Lake Narlay (Eastern France, Jura Mountains) evolution over the last 1200 years: implication for methane cycle. *Journal of Paleolimnology*, 55(1) : 83-96.
- [39] Belle, S., Verneaux, V., **Millet**, L. et al. (2015) A case study of the past CH₄ cycle in lakes by the combined use of dual isotopes (carbon and hydrogen) and ancient DNA of methane-oxidizing bacteria : rearing experiment and application to Lake Remoray (eastern France). *Aquatic Ecology*, 49(3) : 279-291.
- [38] Belle, S., **Millet**, L., Gillet, F., et al. (2015) Assemblages and paleo-diet variability of subfossil Chironomidae (Diptera) from a deep lake (Lake Grand Maclu, France). *Hydrobiologia*, 755(1) : 145-160.
- [37] Frossard, V., Verneaux, V., **Millet**, L., et al. (2015) Changes in carbon sources fueling benthic secondary production over depth and time : coupling Chironomidae stable carbon isotopes to larval abundance. *Oecologia*, 178(2) : 603-614.
- [36]-Doyen, E., Vannière, B., Rius, D., Bégeot, C., **Millet**, L. (2015) Climate and biomass control on fire activity during the late-glacial/early-Holocene transition in temperate ecosystems of the upper Rhone valley (France). *Quaternary research*, 83 (1) : 94-104.
- [35]-Heiri, O., Ilyashuk, B., **Millet**, L., Samartin, S., Lotter, AF. (2015) Stacking of discontinuous regional palaeoclimate records:Chironomid-based summer temperatures from the Alpine region. *The Holocene*, 25(1) : 137-149.
- [34]-Heiri, O. et al. (2014) Validation of climate model-inferred regional temperature change for late-glacial Europe. *Nature Communications*, 5, DOI : 10.1038/ncomms5914.
- [33]-Belle, S., Parent, C., Frossard, V., Verneaux, V., **Millet**, L., Chronopoulou,P.-M., Sabatier, P., Magny, M., (2014) Temporal changes in the contribution of methane-oxidizing bacteria to the biomass of chironomid larvae determined using stable carbon isotopes and ancient DNA. *Journal of paleolimnology*, 53(3) : 215-228.
- [32]-Cupillard, C., Magny, M., Bocherens, H., Bridault, A., Bégeot, C., Bichet, V., Bossuet, G., Drucker, D., Gauthier, E., Jouannic, G., **Millet**, L., Richard, H., Rius, D., Ruffaldi, P., Walter-Simonnet, A-V., (2015). Changes in ecosystems, climate and societies in the Jura Mountains between 40 and 8 ka cal BP. *Quaternary International*, DOI 10.1016/j.quaint.2014.05.032.
- [31]-Rius, D., Galop, G., Doyen, E., **Millet**, L., Vannière, B., (2014) Biomass burning response to high-amplitude climate and vegetation changes in South-western France from the Last glacial to the early Holocene. *Vegetation History and Archaeobotany*, 26(6) : 729-742.
- [30]- Frossard, V., **Millet**, L., Verneaux, V., Jenny, J.P., Arnaud, F., Magny, M., Perga, M.E., (2014) Reconstructing long-term changes (150years) in the carbon cycle of a clear-water lake based on the

stable carbon isotope composition ($\delta C-13$) of chironomid and cladoceran subfossil remains. *Freshwater Biology*, 59(4):789-802.

[29]-**Millet**, L., Massa, C., Bichet, V., Belle, S., Gauthier, E., (2014) Anthropogenic versus climatic control in a high-resolution 1500-year chironomid stratigraphy from a southwestern Greenland lake. *Quaternary Research*, 81(2) : 193-202.

[28]-Frossard, V., **Millet**, L., Verneaux, V., Jenny, J.P., Arnaud, F., Magny, M., Perga, M.E., (2014) Depth-specific responses of a chironomid community to contrasting anthropogenic pressures: a paleolimnological perspective from the last 150 years. *Freshwater Biology*, 59(1): 26-40.

[27]-Magny, M. et al. (2013) North–south palaeohydrological contrasts in the central Mediterranean during the Holocene: tentative synthesis and working hypotheses. *Climate of the Past*. 9, 2043-2071.

[26]-Frossard, V., **Millet**, L., Verneaux, V., Jenny, J.P., Arnaud, F., Poulénard, J., Magny, M., Perga, M.E., (2013) Chironomid assemblage reconstructions at multiple depths describe the oxygen-driven changes in a deep French lake during the last 150 years. *Journal of Paleolimnology*. 50(3): 257-273.

[25]-Birck, C., Epailard, I., Leccia, M-F., Crassous, C., Morand, A., Miaud, C., Bertrand, C., Cavalli, L., Jacquet, S., Moullec, P., Bonnet, R., Sagot, C., Franquet, E., Nellier, Y.M., Perga, M.E., Cottin, N., Pignol, C., Malet, E., Naffrechoux, E., Giguët-Covex, C., Jouffroy-Bapicot, I., Etienne, D., **Millet**, L., Sabatier, P., Wilhelm, B., Perren, B., Arnaud, F., (2013) Sentinel lakes: a network for the study and management of mountain lakes in the French Alps and in Corsica. *Eco Mont-Journal on Protected Mountain Areas Research*. 5(1): 63-69.

[24]-Frossard, V., Belle, S., Verneaux, V., **Millet**, L., Magny, M., (2013) A study of the ^{13}C offset between chironomid larvae and their exuvial head capsules: a contribution to palaeoecology. *Journal of Paleolimnology*. 50(3): 379-386.

[23]-Jenny, J-P, Arnaud, F., Dorioz, J-M, Giguët Covex, C, Frossard, V., Sabatier, P., **Millet**, L., Reyss, J-L, Tachikawa, K., Bard, E., Pignol, C., Soufi, F., Romeyer, O., Perga, M-E. (2013) A spatiotemporal sediment investigation highlights the dynamics of hypolimnetic hypoxia in a large hard water lake over 150 years. *Limnology and Oceanography*. 58(4), 1395-1408.

[22]-Simonneau A, Doyen E., Chapron E., **Millet** L., Vannière B., Di Giovanni C., Bossard N., Tachikawa K., Bard E., Alb ric P., Desmet M., Roux G., Lajeunesse P., Berger J-F., Arnaud F. (2013) Holocene land–use evolution and associated soil erosion in the French Prealps inferred from Lake Paladru sediments and archaeological evidences. *Journal of Archaeological Sciences*. 40(4): 1636-1645.

[21]-Gigu t–Covex, C., Arnaud, F., Enters, D., Poul nard, J., **Millet**, L., Francus, P., David, F., Rey, P.J., Wilhelm, B., Delannoy, J.J., (2012). Frequency and intensity of high altitude floods over the last 3.5 ka in NW French Alps (Lake Anterne). *Quaternary Research*. 77(1): 12–22.

[20]-**Millet**, L., Rius, D., Galop, D., Heiri, O., Brooks, S.J., (2012). Chironomid–based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech paleolake record (French western Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 315: 86–99.

- [19]-Magny, M., Peyron, P., Gauthier, E., Vannière, B., **Millet, L.**, Vermot-Desroches, B., (2011) Quantitative estimates of temperature and precipitation changes over the last millennium from pollen and lake-level data at Lake Joux, Swiss Jura Mountains. *Quaternary research* 75: 45-54.
- [18]-Magny, M., Vannière, B., Calo, C., **Millet, L.**, Leroux, A., Peyron, O., Zanchetta, G., La Mantia, T., Tinner, W. (2011) Holocene hydrological changes in south-western Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lago Preola, a coastal lake in southern Sicily, Italy. *Quaternary Science Reviews* 30(19-20): 2459-2475.
- [17]-**Millet, L.**, Giguet-Covex, C., Verneaux, V., Druart, J-C., Adatte, T., Arnaud, F., (2010) Reconstruction of the recent history of a large deep prealpine lake (Lake Bourget, France) using subfossil chironomids, diatoms, and organic matter analysis: towards the definition of a lake-specific reference state, *Journal of Paleolimnology* 44(4): 963-978.
- [16]-Giguet-Covex, C., Arnaud, F., Poulencard, J., Enters, D., Reyss, J-L., **Millet, L.**, Lazzaroto, J., Vidal, O., (2010) Sedimentological and geochemical records of past trophic state and hypolimnetic anoxia in large, hard-water Lake Bourget, French Alps, *Journal of Paleolimnology*, 43: 171-190 DOI 10.1007/s10933-009-9324-9
- [15]-Wall, A. A. J., Magny, M., **Millet, L.**, Gilbert, D., (2010) Les changements climatiques et les variations d'assemblages de Th camoebiens au lac du Lautrey (Jura, France) au cours de la transition Tardiglaciaire-Holocène. Climatic changes during the Lateglacial-Holocene transition as reflected by variations in testate amoeba assemblages at Lake Lautrey (Jura Mountains, eastern France), *Quaternaire*, 21(3): 295-304
- [14]-Magny, M., Arnaud, F., Holzhauser, H., Chapron, E., Debret, M., Desmet, M., Leroux, A., **Millet, L.**, Revel, M., & Vannière, B., (2010). Solar and proxy-sensitivity imprints on paleohydrological records for the last millennium in west-central Europe, *Quaternary Research*, 73(2): 173-179.
- [13]-**Millet, L.**, Arnaud, F., Heiri, O., Magny, M., Verneaux, V., Desmet, M., (2009) Late Holocene summer temperature reconstruction from chironomid assemblages of Lake Anterne, northern French Alps, *The Holocene*, 19(2): 317-328 DOI 10.1177/0959683608100576
- [12]-Walter-Simonnet, A-V., Bossuet, G., Develle, A-L., Bégeot, C., Ruffaldi, P., Magny, M., Adatte, T., Simonnet, J-P., Rossy, M., Vannière, B., Thivet, M., **Millet, L.**, R gent, B., Wackenheim, C., (2008) Chronologie et spatialisation de retomb es de cendres volcaniques tardiglaciaires dans les massifs des Vosges et du Jura, et le plateau Suisse, *Quaternaire*, 19(2): 117-132.
- [11]-**Millet, L.**, Vannière, B., Magny, M., De Beaulieu, J-L., Disnar, J-R., Laggoun-D farge, F., Verneaux, V., Walter-Simonnet, A-V., Ortu, E., Bossuet, G., (2007) Response of littoral chironomid community and organic matter to late glacial lake level and environmental changes at Lago dell'Accesa (Tuscany, Italy), *Journal of Paleolimnology*, 38: 525-539, DOI 10.1007/s10933-007-9088-z
- [10]-Drescher-Schneider, R., De Beaulieu, J-L., Magny, M., Walter-Simonnet, A-V., Bossuet, G., **Millet, L.**, Brugiapaglia, E., Drescher, A., (2007) Vegetation history, climate and human impact over

the last 15,000 years at Lago dell'Accesa (Tuscany, Central Italy), *Vegetation History and Archaeobotany*, 16: 279-299.

[9]-Magny, M., Vannière, B., De Beaulieu, J-L., Bégeot, C., Heiri, O., **Millet, L.**, Peyron, O., Walter-Simonnet, A-V., (2007) Early-Holocene climatic oscillations recorded by lake-level fluctuations in west-central Europe and in central Italy, *Quaternary Science Reviews*, 26(15/16): 1951-1964.

[8]-Magny, M., De Beaulieu, J-L., Drescher-Schneider, R., Vannière, B., Walter-Simonnet, A-V., Miras, Y., **Millet, L.**, Bossuet, G., Peyron, O., Brugiapaglia, E., Leroux, A., (2007) Holocene climate changes in the central Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lake Accesa (Tuscany, Italy)., *Quaternary Science Reviews*, 26(13/14): 1736-1758.

[7]-Becker, A., Amman B., Anselmetti, F., Hirt, A., Magny, M., **Millet, L.**, Rachoud, A., Sampietro, G., and W thrich, C., (2006) Paleoenvironmental studies on lake Bergsee, Black Forest, Germany, *Neues Jahrbuch f r Geologie und Paléontologie*, 250(3): 405-445.

[6]-Magny, M., de Beaulieu, J-L., Drescher-Schneider, R., Vannière, B., Walter-Simonnet, A-V., **Millet, L.**, Bossuet, G., and Peyron, O., (2006) Climatic oscillation in central Italy during the Last Glacial-Holocene transition : the record from Lake Accesa, *Journal of Quaternary Science*, 21(4): 311-320.

[5]-Magny, M., Aalbersberg, G., Bégeot, C., Benoit-Ruffaldi, P., Bossuet, G., Disnar, J-R., Heiri, O., Laggoun-Defarge, F., **Millet, L.**, Peyron, O., Vannière, B., Walter-Simonnet, A-V. (2006) Environmental and climatic changes in the Jura mountains (eastern France) during the Last Glacial-Interglacial transition: a multi-proxy record from Lake Lautrey, *Quaternary Science Review*, 25(5-6): 414-445.

[4]-Heiri, O. & **Millet, L.** (2005) Reconstruction of Late Glacial summer temperatures from chironomid assemblages in Lac Lautrey (Jura, France), *Journal of Quaternary Science*, 20(1): 33-44.

[3]-Peyron, O., Bégeot, C., Brewer, S., Heiri, O., Magny, M., **Millet, L.**, Ruffaldi, P., Van Campo, E., Yu, G. (2005) Lateglacial climate in the Jura mountains (France) based on different quantitative reconstruction approaches from pollen, lake-levels, and chironomids, *Quaternary Research*, 64(2): 197-201.

[2]-**Millet, L.**, Verneaux, V. & Magny, M. (2003) Lateglacial paleoenvironmental reconstruction using subfossil chironomid assemblages from Lake Lautrey (Jura, France), *Archiv für Hydrobiologie*, 56(3): 405-429.

[1]-**Millet, L.** & Verneaux, V., (2003) Evolution des assemblages de Chironomidae (Insecta : Diptera) pendant le Tardiglaciaire dans le lac du Lautrey (Jura, France) : essai de reconstruction paléoenvironnementale, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 96: 99-107.

2- Actes de colloque à comité de lecture

Millet, L., (2013): Les assemblages de Chironomidae, nouveaux bio-marqueurs climatiques des archives lacustres. Actes de la table ronde RTP «Paysage et Environnement», Chilhac.

Millet, L., Ortu, E., Miras, Y., Heiri, O., Magny, M., De Beaulieu, J.-L., (2008) Les assemblages de Chironomidae et les cortèges polliniques, outils de reconstitutions quantitatives des changements du climat holocène : une approche croisée au Col du Petit St Bernard, lac « Dessus-Verney », 2280 m, Collection EDYTEM - Cahiers de Paléoenvironnement, Du climat à l'homme. *Dynamique holocène de l'environnement dans le Jura et les Alpes*, 6: 65-76, colloque GDR JURALP (2007) Aix-en-Provence

Magny, M., **Millet, L.**, Arnaud, F., Desmet, M., Gauthier, E., Heiri, O., Vannière, B., Verneaux, V., (2008) Variations du climat au cours des deux derniers millénaires : deux cas d'étude dans le Jura et les Alpes du Nord, Collection EDYTEM - Cahiers de Paléoenvironnement, *Du climat à l'Homme. Dynamique holocène de l'environnement dans le Jura et les Alpes*, 6: 51-64, colloque GDR JURALP (2007) Aix-en-Provence

de Beaulieu, J.-L., Magny, M., Bossuet, G., Drescher-Schneider, R., Brugiapaglia, E., Cheddadi, R., **Millet, L.** (2002) Lago dell'Accesa (Tuscany). A key site for environment and lake level changes in Central Italy. First results and working hypotheses. *Terra Nostra. Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung*, 2001/2 : 19-23.

3- livres, ouvrages et divers

Gandois, L., **Millet, L.**, Montargès-Pelletier, E. (2017) Archives et flux sédimentaires et biogéochimiques. In Perspectives de Bordeaux, Compte-rendu des journées des 22, 23 et 24 février 2017, bordeaux. Les cahiers prospectives CNRS.

Bichet, V., Massa, C., **Millet, L.**, Perren, B. (2016) Les sédiments lacustres, mémoire du climat et des activités humaines. - Groenland - climat, écologie, société CNRS Editions, pp.55-59.

Bichet, V., Massa, C., Guillemot T., Gauthier, E., Millet, L., Perren, B., Christophe, P., Richard, H. (2016) Changements climatiques, adaptations sociétales et mutations écologiques en zone subarctique : la mémoire des lacs groenlandais. In Barral P., Magny M., Thivet M. De la reconstitution des paysages à l'histoire des sociétés : 10 000 ans d'archives sédimentaires en zones humides, InFolio éditions, 288 p, 2016

Millet, L., Verneaux, V., Belle, S., Frossard, V., Rius, D., Mavon, C., Magny, M. (2016) Les archives sédimentaires pour comprendre la réponse des lacs aux changements environnementaux d'échelles locales à globales : Enjeux, stratégie et méthodes. In Barral P., Magny M., Thivet M. De la reconstitution des paysages à l'histoire des sociétés : 10 000 ans d'archives sédimentaires en zones humides, InFolio éditions, 288 p.

Belle, S., Frossard, V., Verneaux, V., **Millet, L.**, Parent, C., Etienne, D., Perga, M.E., Magny, M. (2015) Les archives sédimentaires pour comprendre la réponse des lacs aux changements

environnementaux d'échelles locales à globales : application aux lacs d'Annecy et de Narlay. In Barral P., Magny M., Thivet M. De la reconstitution des paysages à l'histoire des sociétés : 10 000 ans d'archives sédimentaires en zones humides, InFolio éditions, 288 p.

Arnaud, F., Giguet-Covex, C., Wilhelm, B., Jenny, J.P., Sabatier, P., Poulenard, J., Desmet, M., Enters, D., Révillon, S., **Millet, L.**, Debret, M., Pignol, C., Malet, E., Fanget, B. (2014) L'objet emblématique Lacs de Montagne : L'étude des sédiments lacustres au laboratoire EDYTEM. - Environnements, Dynamiques et Territoires de la montagne Collection EDYTEM, pp. 107-118, 2014, Collection EDYTEM n°16.

Gauthier, E., Richard, H., Massa, C., Perren, B., Bichet, V., **Millet, L.** (2014) Retro-observation des interactions hommes-milieux et de leurs conséquences sur l'environnement : le cas de l'agriculture au Groenland. - Les interactions hommes-milieu. R. Chenorkian et S. Robert. Les interactions hommes-milieu. Questions et pratiques de la recherche en environnement, Editions Quae, Paris, pp.65-76, 2014, Collections Indisciplines, 978-2-7592-2187-5

Magny M., **Millet L.**, Frossard V., Verneaux V. (2013) Hier pour éclairer demain : les rétro-observatoires. In : Euzen et al. , Le développement durable à découvert, CNRS Editions.

Millet, L., Bégeot, C. (2006) Réponse de la végétation et de l'écosystème lacustre aux changements du climat et à l'impact anthropique au cours des deux mille dernières années. *In* M. Colardelle et E. Verdel, «L'habitat fortifié médiéval de Colletière à Charavines et le Lac de Paladru (Isère). Recherches archéologiques et paléoenvironnementales. Rapport intermédiaire 2006.

Miras, Y., **Millet, L.**, Guiter, F., Ponel, P., de Beaulieu, J-L., Gozlar, T. (2006) Dynamique des écosystèmes et impact de l'homme dans le secteur du Petit Saint-Bernard au cours de l'Holocène. Archéologie sans frontière au col du Petit-Saint-Bernard, actes du séminaire de clôture Alpis Graia, 2-4 mars 2006 Aoste, p. 31-50 .

Magny, M., Bégeot, C., Ruffaldi, P., Bossuet, G., Marguet, A., Billaud, Y., **Millet, L.**, Vannièrre, B., Mouthon, J. (2002) Variations paléohydrologiques de 14700 à 11000 cal BP dans le Jura et les Préalpes françaises. *In* : «Bravard, J.-P. ; Magny, M.» (éd.), *Les fleuves ont une histoire. Paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans*, Paris : Errance, 135-142.

4- Conférence invitée

« Reconstitutions paléoclimatiques et trajectoires écologiques, approches croisées dans les archives lacustres » XXIVème Symposium APLF, Pontarlier 14, 15 et 16 septembre 2015

« Subfossil chironomids in paleolimnology: from the inference of temperature changes to the reconstruction of lake functioning history » Séminaire Institute of Ecosystem Study, Verbania 21 mars 2014