



HAL
open science

Fonctionnement des Écosystèmes Lacustres et Séquestration du Carbone à l'Anthropocène

Jean-Philippe Jenny

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Jenny. Fonctionnement des Écosystèmes Lacustres et Séquestration du Carbone à l'Anthropocène. Sciences de l'environnement. Université Savoie Mont Blanc, 2024. tel-04816985

HAL Id: tel-04816985

<https://hal.inrae.fr/tel-04816985v1>

Submitted on 3 Dec 2024

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.

Manuscrit HDR

Pour obtenir le diplôme d'

HABILITATION à DIRIGER des RECHERCHES de l'UNIVERSITE SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : Sciences Terre, Univers et Environnement

Arrêtés ministériels des 23 novembre 1988 et 13 février 1992

Présenté par

Jean-Philippe JENNY

Titre : Fonctionnement des Écosystèmes Lacustres et Séquestration du Carbone à l'Anthropocène

*Du développement méthodologique à l'échelle des
observatoires aux prospections globales par l'assimilation
de données paléolimnologiques et la modélisation*

HDR soutenue publiquement le « **24 Octobre 2024** »,
devant le jury composé de :

Mme Nathalie DUBOIS

Professeure, Département de la Recherche et de la Gestion des Eaux de
Surface, Eawag, Suisse (Rapporteur)

Mr Jerome GAILLARDET

Professeur, Institut de Physique du Globe de Paris (Rapporteur)

Mme Brigitte VINÇON LEITE

Directeur de Recherche, École des Ponts ParisTech (Rapporteur)

Mr John SMOL

Professeur distingué, Département de Biologie de l'Université Queen's,
Kingston, Ontario (Examineur)

Mr Daniel ARIZTEGUI

Professeur Émérite, Université de Genève, Sciences de la Terre et de
l'Environnement, Suisse (Examineur)

Mr Thierry CAQUET

Directeur de Recherche INRAE, UMR ESE (Examineur)

Mr Jérôme POULENARD

Professeur, Université Savoie Mont Blanc USMB (Président)

Table des matières

VOLET 1 CURRICULUM VITAE	4
SECTION 1.1 – INFORMATIONS GÉNÉRALES.....	5
SECTION 1.2 – PARCOURS.....	5
SECTION 1.3 – FINANCEMENTS	5
SECTION 1.4 – ENCADREMENT ET ENSEIGNEMENT	7
SECTION 1.5 – COORDINATIONS ET RÉSEAUX SCIENTIFIQUES	9
SECTION 1.6 – PUBLICATIONS.....	12
VOLET 2 SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE	19
SECTION 2.1 INTRODUCTION ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE.....	20
1. <i>Propos liminaires</i>	20
2. <i>Contribution des lacs dans le cycle global du carbone</i>	22
3. <i>Trajectoires et contrôles temporels affectant les stocks et des flux de carbone dans les lacs à l’anthropocène</i>	27
4. <i>Les limites méthodologiques à la compréhension des flux et stocks de carbone lacustre long-terme</i>	31
5. <i>Question : Quelles modalités de la perturbation anthropique du cycle du carbone lacustre à l’anthropocène ?</i>	33
6. <i>Conclusion : positionnement et organisation des activités de recherche autour de l’analyse des stocks et des flux de carbone lacustres à l’Anthropocène</i>	34
SECTION 2.2 – DÉVELOPPEMENT D’UNE MÉTHODE D’ASSIMILATION DES DONNÉES PALÉOLIMNOLOGIQUES ET DES MODÈLES MÉCANISTES POUR L’ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT LACUSTRE ET DU CYCLE DU CARBONE	36
7. <i>Marqueurs paléolimnologiques des flux, stocks et sources de carbone, et niveaux de confiance</i>	36
8. <i>Marqueurs des conditions d’oxygénation lacustre et de préservation du carbone</i>	43
9. <i>Modèles hydrodynamiques et biogéochimiques lacustres 1D (GLM, MyLake, SIMSTRAT, AED2+)</i>	46
10. <i>Développement d’une méthode d’assimilation des données paléolimnologiques pour la modélisation</i>	48
11. <i>La place centrale des observatoires des lacs pour valider les marqueurs paléolimnologiques et les modèles</i>	56
SECTION 2.3 – PERTURBATION DES CONDITIONS DE PRÉSERVATION DU CARBONE AU COURS DU XXIÈ SIÈCLE	59
12. <i>Mise en place historique de l’hypoxie dans les lacs de l’Observatoire OLA</i>	60
13. <i>Mise en place historique des conditions hypoxiques dans les lacs du monde</i>	64
14. <i>Hypoxie des lacs européens sous contrôle des sources ponctuelles et diffuses de nutriments</i>	67
15. <i>Réconcilier les observations limnologiques et paléolimnologiques</i>	71
SECTION 2.4 – RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET EFFETS SUR LE CYCLE DU CARBONE LACUSTRE AU XXIÈ SIÈCLE	72
16. <i>Impacts du CC sur le régime thermique des lacs stratifiés (1850-2100)</i>	73
17. <i>Impacts du CC sur les indicateurs de métabolisme lacustre : l’oxygène dissous et le carbone (1850-2100)</i>	74
18. <i>Prospective des effets du CC : Tendances et défis à venir concernant les services rendus</i>	77
SECTION 2.5 – ACCÉLÉRATION DE L’ÉROSION ET DES EXPORTS DE CARBONE ALLOCHTONE IL Y A 4000 ANS	82
19. <i>Reconstitution de la variabilité millénaire de l’érosion à l’échelle mondiale</i>	83
20. <i>Quantification de la variabilité centennale de l’érosion de surface, de l’érosion par incision et des crises érosives</i> ..	87
21. <i>Nécessité de poursuivre l’intégration des modèles et des données paléolimnologiques</i>	90
VOLET 3 PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR UNE ESTIMATION GLOBALE DES FLUX ET STOCKS DE CARBONE LACUSTRES	91
SECTION 3.1 – INTÉGRER MODÈLES ET SYNTHÈSES PALÉOLIMNOLOGIQUES POUR UNE ÉVALUATION MONDIALE DU RÔLE DES EAUX LENTHIQUES DANS LE SYSTÈME CLIMATIQUE : DE LA FORMATION DES STOCKS DE C AUX ÉMISSIONS DE GES (PROJET PEPR FAIRCARBON)	92
SECTION 3.2 – SURVEILLANCE ET GESTION DES ÉCOSYSTÈMES LACUSTRES : INTÉGRATION DES APPROCHES PALÉOLIMNOLOGIE-MODÈLES DANS LES OBSERVATOIRES POUR UNE COMPRÉHENSION LONG-TERME DES LACS	101
CONCLUSION	103
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	105

Table des illustrations

Figure 1.	Positionnement de l'axe 2 et de l'équipe dans l'unité CARTEL.	10
Figure 2.	Structuration actuelle autour du cycle du carbone.	11
Figure 3.	Parcours et articulation des activités de recherche.	18
Figure 4.	Concept des transferts et de la transformation de carbone dans le continuum terre-mer (aka LOAC).	21
Figure 5.	Distribution des lacs dans le monde	23
Figure 6.	Taux actuels d'accumulation et des émissions de carbone dans les lacs et les réservoirs.	24
Figure 7.	Repositionnement des eaux intérieures dans le bilan carbone global.	26
Figure 8.	Evolution de la sequestration du carbone lacustre depuis 1850.	28
Figure 9.	Facteurs de contrôle identifiés du cycle du carbone lacustre	29
Figure 10.	Résumé des principaux facteurs de contrôle historique du cycle du carbone adressé dans ce programme.	30
Figure 11.	Échelle temporelle couverte par les études de modélisation publiées de 2015 à 2020.	31
Figure 12.	Principaux flux de sédiments et de carbone (C) allochtones et autochtones	34
Figure 13.	Périmètre du programme.	35
Figure 14.	Positionnement des recherches et organisation de ce manuscrit de HDR.	Error! Bookmark not defined.
Figure 15.	Datation de sédiments superficiels lacustres.	37
Figure 16.	Acquisition d'un banc d'analyse MSCL-S (© Geotek) en partenariat avec CNRS EDYTEM.	41
Figure 17.	Zones d'oscillation des varves : archivage des conditions à l'interface eau/sédiments.	43
Figure 18.	Étendue de la zone hypoxique dans le lac Léman	44
Figure 19.	Évolution des concentrations d'oxygène dans la colonne d'eau du lac Léman depuis 1960.	45
Figure 20.	Couplage des modèles hydrodynamiques (e.g. GLM) et écodynamiques (e.g. AED).	46
Figure 21.	Schéma conceptuel du modèle AED.	47
Figure 22.	Repositionnement de l'approche d'assimilation proposée dans ce programme	48
Figure 23.	Concept général de l'assimilation développée dans ce programme	49
Figure 24.	Principe de l'assimilation modèles-données développée pour les études long-terme.	51
Figure 25.	Schéma conceptuel des scénarios climatiques de forçages au modèle GLM-AED.	52
Figure 26.	Données d'entrée du modèle GLM-AED2	54
Figure 27.	Reconstruction des apports journaliers de phosphore.	55
Figure 28.	Localisation des 4 grand lacs périalpins de l'observatoire des lacs (OLA).	57
Figure 29.	Nombre de lacs et période couverte par les suivis instrumentaux dans GLEON.	58
Figure 30.	Principaux changements attendus dans le fonctionnement des lacs et le devenir du carbone.	60
Figure 31.	Localisation des lacs Léman, Bourget et Annecy	60
Figure 32.	Mise en évidence de conditions bien oxygénées au cours des derniers milliers d'années	61
Figure 33.	Évolution des volumes hypoxiques et de ses contrôles au cours des 130 dernières années.	62
Figure 34.	Localisation des 365 sites enregistrant l'hypoxie lacustre dans leurs archives sédimentaires.	64
Figure 35.	Mise en place de l'hypoxie lacustre et marine au cours des 300 dernières années.	65
Figure 36.	Localisation des 1 607 sites d'étude de l'hypoxie en Europe.	67
Figure 37.	Tendances de la mise en place de l'hypoxie lacustre et de l'urbanisation.	68
Figure 38.	Tendances centennales d'occupation des sols en Europe.	69
Figure 39.	Résultats du modèle GAMM.	69
Figure 40.	Réconcilier les observations par l'intégration et la modélisation.	71
Figure 41.	Variations temporelles des températures de l'épilimnion.	72
Figure 42.	Trois dimensions temporelles de notre approche.	73
Figure 43.	Modélisation des valeurs annuelles dans la colonne d'eau du phosphore total et de l'oxygène	74
Figure 44.	Simulation de l'effet climatique sur l'intensité et la durée de l'hypoxie	75
Figure 45.	Représentation de l'espace de fonctionnement sûr pour les conditions annuelles en oxygène.	76
Figure 46.	Lac d'Annecy et la station de mesure du Grand Lac.	77
Figure 47.	Profondeur maximale annuelle du pic de chlorophylle a et distance à la prise d'eau potable	79
Figure 48.	Description de l'évolution de la thermocline et du métalimnion en été.	79
Figure 49.	Volumes d'eau de qualité optimale pour la reproduction (thermie et oxygène) des salmonidés.	80
Figure 50.	(A) Emplacement des 632 sites d'étude et variations des taux de sédiment lacustre.	83
Figure 51.	Tendances des accumulations sédimentaire lacustres (C)	84
Figure 52.	Tendances à l'échelle de l'Holocène dans 12 sites annuellement résolus avec varves.	85
Figure 53.	Tendances de l'érosion en Europe et en Amérique du Nord Durant l'Holocène	86
Figure 54.	Développement d'une approche d'assimilation de modèle spatialisé d'érosion et des proxys d'érosion.	87
Figure 55.	Régressions entre érosion simulé par le modèle RUSLE et les proxys sédimentaires.	88

Figure 56.	Simulations de l'érosion sur l'Holocène pour les six sites pilotes.	88
Figure 57.	L'érosion et l'ouverture du paysage sont liés.	89
Figure 58.	Distribution des sites d'étude multi-proxys LACCORE et des sites de OLA	90
Figure 59.	Le système lac-bassin versant - Unité spatial de base de l'étude.....	94
Figure 60.	Sites d'étude et données d'entrée pour contraindre les modèles de surface terrestre et de lac.	95
Figure 61.	Structure générale de DEEP-C et interactions avec le PC5 dans FairCarboN.....	97
Figure 62.	Résumé des tâches dans le WP1	98
Figure 63.	Résumé des tâches dans le WP2.	99
Figure 64.	Résumé de l'organisation du WP3.	99
Figure 65.	Les classes de qualité standardisées selon le Ratio de Qualité Écologique (EQR).....	101

Volet 1 Curriculum vitae

Section 1.1 – Informations générales

Jean-Philippe JENNY, Né(e) le 27 mars 1984 (40 ans) à Lille, France

Adresse (privée) : 128 Chemin du Pieu, 74600 Quintal, France

Adresse (professionnelle) : INRAE-UMR CARTELE, Université Savoie Mont-Blanc, 75bis av. de Corzent - CS 50511 FR-74203 Thonon les Bains cedex, France

tel : +33 (0)4 79 75 86 49

mail : Jean-Philippe.Jenny@inrae.fr

Section 1.2 – Parcours

Fonction actuelle

2018 -... Chargé de Recherche CRCN à INRAE ([URL](#))

2020 -... Coordinateur de l'axe *Biogéochimie lacs et bassins versants* au CARTELE([URL](#))

Parcours professionnel

2018 Recrutement au concours de Chargé de Recherche 1^{er} classe INRAE (CR1)

2016–2018 Postdoctoral fellow AXA, Max Planck Institute for biogeochemistry, Allemagne ([URL](#))

2016 (3 mois) Chercheur-Visiteur à McGill, Biology Department, Canada

2013–2016 Postdoctoral fellow, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Canada

2010–2013 Doctorat Sédimentologie & Paléolimnologie, USMB, France

Formation

2009 Master Sédimentologie (Lithosphère, Bassin, Pétrole), Université Jussieu UPMC, Paris, France

2009 (7m.) Stage de master, sédimentologie fluviale, Ecole des Mines, Paris, France

2008 Master Géologie (*Marine sedimentology & Resources*) U. Cardiff, Pays de Galles, Royaume Unis

2007 Licence Géologie (Sciences de la Vie et de la Terre), Université de Lille, France

Award : 2018 Early Career Awards – International Paleolimnology Association, Stockholm, 2018 ([URL](#))

Section 1.3 – Financements

Catégorisation des soutiens financiers autour du fonctionnement des lacs & cycle du carbone

	Périmètre	Domaine	Questions
Type appui 1	Large échelle (globale)	Fondamental	Bilan masse, trajectoires, forçage
Type appui 2	Locale (OLA)	Fondamental & Opérationnel	Qualité eau, dynamique écosystème, scénarios
Type appui 3	Locale (OLA)	Fondamental & Opérationnel	Taux accumulation du carbone, taux accumulation sédimentaire, taux exports des bassins versants

CIPEL : Commission internationale pour la protection des eaux du Léman

SILA : Syndicat Mixte du Lac d'Annecy

FREE ALPES : Fédération de recherche

Financements des 5 dernières années (2018-2023) :

Années	Acronyme	Titre	Financier		Budget
2023 – 2027	FairCarboN DEEP-C	« Carbon sink or methane source – local to global scale assesment of lentic waters' role in the climate system »	PEPR ANR	PI	1.5M €
2023 – 2027	FairCarboN PC5 WP2	« Le carbone dans les écosystèmes continentaux : leviers et trajectoires pour la neutralité carbone » Emission de CO ₂ et CH ₄ des plans d'eau	PEPR ANR	Co-PI	187,000 €
2023 – 2027	FairCarboN PC5 WP7	« Le carbone dans les écosystèmes continentaux : leviers et trajectoires pour la neutralité carbone » Stocks de carbone des sediments continentaux (c.f.plans d'eau)	PEPR ANR	Co-PI	235,000 €
2020 – 2024	C-ARCHIVES	« Global soil erosion and carbon transfers to inland waters during the Anthropocene: A paleolimnological approach »	ANR JCJC	PI	254,000 €
2021 – 2022	C-Sensible	<i>Préfiguration au PEPR FairCarboN</i> « Sensibilité des exports de carbone des sols à l'érosion et à la productivité primaire »	MITI INRAE- CNRS	PI	45,000 €
2022 – 2023	Phosphore	« Quel objectif Phosphore pour le Léman » Modélisation 1D lacustre couplée avec archives paleo	CIPEL	PI	45,400 €
2024 – 2025	AED perialpins (Volet 3)	« Modélisation de la dynamique écologique long-terme des lacs profonds périalpins soumis aux changements climatiques et des apports en nutriments (Volet 3) »	OFB Pole ECLA	PI	20,000 €
2022 – 2023	AED perialpins (Volet 2)	« Modélisation de la dynamique écologique long-terme des lacs profonds périalpins soumis aux changements climatiques et des apports en nutriments (Volet 2) »	OFB Pole ECLA	PI	23,800 €
2021 – 2022	AED perialpins (Volet 1)	« Modélisation de la dynamique écologique long-terme des lacs profonds périalpins soumis aux changements climatiques et des apports en nutriments (Volet 1) »	OFB Pole ECLA	PI	10,000 €
2021 – 2022	AED Annecy	« Étude prospective du Lac d'Annecy » Projet sur la modélisation 1D (carbone, O ₂) des eaux du lac Annecy	SILA	PI	79,357 €
2022 – 2023	Tignes	« Prospection de la qualité des eaux du lac de Tignes » Modélisation 1D lacustre couplée avec archives paléo	Tignes Communes	PI	58,000 €
2019 – 2022	PACHA	Thèse « Rôle de la productivité primaire dans le contrôle de la séquestration de carbone par les lacs »	INRAE- USMB	PI	96,000 €
2019 – 2022		Séquestration du carbone par les lacs à l'Anthropocène (soutien pour projet PACHA)	INRAE- AQUA	PI	12,000 €
2018 – 2019		« Sol erosion during the Anthropocene - The case study of Aigueblette » Approche paleo & sismique	FREE ALPES	PI	11,000 €

Financements avant 2018 :

Années	Acronyme	Titre	Financier	Budget
2016 – 2018		« Changements globaux dans les taux d'érosion des sols durant l'Anthropocène » Archives paleo, pollens & 14C	AXA Grant	120,000 €

Section 1.4 – Encadrement et enseignement

Activités pédagogiques :

J'interviens régulièrement depuis 2012 dans des formations universitaires.

2024 : Intervention pour l'Ecole thématique PALEOS « Cycle du carbone », Centre Paul-Langevin ([URL](#))

Depuis 2018 : intervention Master Ecomont (U. Savoie Mont-Blanc), CM, TP Biogéochimie, cycle du C

2018 – 2019 : Intervention en Licence ; Introduction à la Paleolimnologie (USMB)

2019 : Participation à l'animation de l'école d'été Ecologie Aquatique avec U. Trois Rivières (Canada)

2011 – 2012 : Intervention en Licence ; Statistiques ; Paleoclimatologie et Paléo-environnement (USMB)

2013 : Participation à la fête de la Science ; thème cycles de la matière organique

Depuis 2016 : Intervention pédagogiques dans séminaires de paléolimnologie (e.g. IPS2016, Stockholm)

2012 : Contribution à des ouvrages grand public (Zone Atelier Bassin du Rhône « Les lacs en 80 questions »)

Mes activités pédagogiques s'effectuent également au travers des encadrements de stagiaires et doctorants : initiation à la programmation (R), aux plateformes de calcul et de stockage (MUST du LAPP), aux statistiques (e.g. multivariés, modèles additifs, arbres de décisions...), à la modélisation (GLM, AED2), au *datamining* et au développement de bases de données, aux activités de terrain (carottages sédimentaires et suivis limnologiques), et aux thématiques en géosciences en lien avec mes activités de recherches. Il est à envisager que certaines de ces activités pédagogiques orientées sur l'analyse de données et la limnologie se formalisent à terme à l'USMB par des enseignements ou des interventions diverses.

Encadrement de Postdocs

- 2022 - 2024 (18+10 mois) Laura Soares, Vers des approches intégrées pour évaluer l'état des lacs européens sur la période 1850-2100 : couplage des modèles mécanistes 1D, des données limnologiques et paléolimnologiques. Direction : Jean-Philippe Jenny & Victor Frossard

Direction de thèses

- 2023 - 2026 Tifenn Primet, « EDM Paleo : Dynamiques non-linéaires à long terme des écosystèmes lacustres : quelles causalités des forçages locaux et globaux ? » Direction : V Frossard, J-P Jenny
- 2021 - 2024 Théo Mazure, « Global soil erosion and carbon transfers to inland waters during the Anthropocene: coupling model and paleolimnological approaches » Direction : Jean-Philippe Jenny, Georges-Marie Saulnier, Patrick Durand
- 2019 - 2022 Julie Rotschi, PhD-Student: "Role of primary productivity in the control of carbon sequestration by lakes at regional and global scales during Anthropocene: coupling of paleolimnological, ecogenomic and pigmentary approaches". CARRTEL, USMB, Direction : Jean-Philippe Jenny, Isabelle Domaizon, Co-encadrant : Irene Gregory-Eaves

Co-Encadrement de thèse

- 2023 - 2026 Justine Frison, « Déterminants biotiques et abiotiques de la variabilité spatiale du carbone lacustre, eau et sédiments? » Direction : Laurent Millet, Hélène Masclaux
- 2015 - 2019 Obinna Nzekwe, « Sédimentation glaciaire à post-glaciaire tardiquaternaire dans trois fjords lacustres adjacents de la Côte-Nord au Québec : résultats de l'analyse sédimentologique et micropaléontologique » Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Direction : Pierre Francus, Patrick Lajeunesse, Co-direction : Jean-Philippe Jenny

Encadrement de CDD

- 2022 – 2025 O. Itier-Desgué, « Ingénieure étude modélisation 1D prospective *qualité des eaux* des lacs » Couplage rétro-observation et scénario sur la période 1800-2100. CARRTEL, USMB, Direction : J-P Jenny
- 2021 – 2022 O. Itier-Desgué, « Ingénieure étude modélisation *1D thermie et oxygène* dessous des lacs » Couplage rétro-observation et scénario sur la période 1800-2100. CARRTEL, USMB, Direction : J-P Jenny
- 2019 (3 mois) J. Félix-Faure, « Ingénieur en traitement de données ». CARRTEL, Direction : J-P Jenny
- 2016 – 2018 (1 an) T. Hammer « technicienne » (16h/w 12 PM) AXA Grant, Direction : J-P Jenny
- 2016 – 2018 (1 an) C. Niemman (5h/w 12 PM) on AXA Grant and Max Planck, Direction : J-P Jenny
- 2016 – 2018 (6 mois) A. Sana (5h/w 12 PM) on AXA Grant and Max Planck, Direction : J-P Jenny
- 2016 – 2018 (1 an) T. Glander (5h/w 12 PM) on AXA Grant and Max Planck, Direction : J-P Jenny
- 2016 – 2018 (6 mois) M. Dar (5h/w 12 PM) on AXA Grant and Max Planck, Direction : J-P Jenny
- 2016 – 2018 (6 mois) R. Weber (5h/w 12 PM) on AXA Grant and Max Planck, Direction : J-P Jenny

Encadrement de Master 2

- 2024 Léana Revirand, « Impacts de la moule quagga sur les flux de P à l'interface eau-sédiment, la séquestration du C dans les sédiments et des éléments dans les coquilles mortes », CARRTEL, USMB, Direction : Jean-Philippe Jenny, Stephan Jacquet
- 2024 Manuel Thouillot, « Développement d'une approche de modélisation 1D pour caractériser l'évolution de l'état et du fonctionnement lacustre sur des périodes de temps longues », CARRTEL, USMB, Direction : Jean-Philippe Jenny, Laura Soares, Olivia Itier-Desgué
- 2023 Valentine Sollier, « Effets de l'érosion des sols sur les exports de carbone dans les plans d'eau Français » CARRTEL, USMB, Direction : J-P Jenny, G-M Saulnier, Vincent Chanudet, Théo Mazure
- 2022 Margot Ferré, « Modélisation des émissions de CO₂ et CH₄ par les lacs » CARRTEL, USMB, Direction : Jean-Philippe Jenny, Laura Soares, Olivia Itier-Desgué
- 2021 Mohammed Barhdadi, « Etude de la séquestration du carbone lacustre Holocène soumise aux variations des taux de production primaire et du climat » CARRTEL, USMB, Direction : J-P Jenny, D Etienne
- 2020 Olivia Itier-Desgué, « 2020 O. Itier, " Modélisation du régime thermique des lacs périalpins de 1700 à 2100: Vers un couplage des approches de long-terme" CARRTEL, USMB, Direction : Jean-Philippe Jenny, David Etienne, Victor Frossard
- 2017 Alexandre Baud, « A quantitative synthesis of the dynamics and drivers of lake sediment rates over the past ~150 years », McGill University Biology Department Direction : Irene Gregory-Eaves, Pierre Francus, co-direction : Jean-Philippe Jenny

- 2011 Mélanie Ferraton, USMB EDYTEM « Évolution de la contrainte anthropique liée aux pratiques domestiques sur le bassin versant du Bourget depuis 1850 » Direction : J-P Jenny, J-M Dorioz
- 2012, Valentin Loiseau, USMB EDYTEM « Analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol, Apport des technologies SIG ». Direction : Jean-Philippe Jenny, Jean-Marcel Dorioz

Activités administratives :

- 2020 – 2024 : Coordinateur de l'axe *Biogéochimie* au CARTEL ([URL](#)), i.e. animation, structuration scientifique, pages web de l'axe, mise en place d'une semaine de séminaire annuelle interne sur Thonon pour aborder les questions thématiques, méthodologiques et d'orientation d'axe et activités de l'unité.
- Depuis 2021 : Membre du comité scientifique de la CIPEL ([URL](#)) *Commission internationale pour la protection des eaux du Léman* (organe intergouvernemental franco-suisse, budget annuel : ~980k€)
- Depuis 2024 : Membre du comité scientifique du CISALB ([URL](#)) Comité Intercommunautaire pour l'Assainissement du Lac du Bourget, France (le CISALB emploie ~23 agents)
- Depuis 2024 : Coordinateur du rapport annuel de suivi limnologique du lac du Bourget pour le CISALB
- Depuis 2018 : Gestion d'équipe (~5 personnes, incluant stagiaires, doctorants, ingénieurs, etc), de programmes de recherche (e.g. ANR, PEPR), du collectif (e.g. portage pour dépôt d'un profil de poste ingénieur d'étude IE en gestion de base de données et modélisation depuis 2021).
- Depuis 2020 : Gestion d'équipement, via notamment l'achat d'équipement pour les plateformes paléo-environnementales à USMB (~200k€ en co-financement 50-50% avec l'UMR CNRS EDYTEM pour un banc MSLC Geoteck, 24k€ pour un équipement de spectrométrie)
- Depuis 2023 : Éditeur associé, *Int. Journal of Limnology* ([URL](#)). Reviewers dans 19 journaux.
- 2010-2012 : Membre du conseil scientifique de l'Université de Savoie

De manière moins formelle : Contribution à l'animation scientifique de l'UMR via l'initiation et l'animation de réunions scientifiques hebdomadaires au CARTEL et LECA ([URL](#)) ; accessoirement, initiateur pour la réfection des espaces communs de l'UMR sur Technolac R+2.

Section 1.5 – Coordinations et réseaux scientifiques

Les axes thématiques au CARTEL sont articulés autour de l'objet lac (Figure 1), incluant 1) l'axe biodiversité et interactions biotiques, 2) l'axe cycles biogéochimiques et 3) l'axe diagnostics écologiques. Mes recherches concernent principalement l'axe 2 mais avec de fortes interactions vers les autres axes. La démarche d'assimilation des modèles mécanistes et des archives sédimentaires a été renforcée par les collaborations au sein du second axe de l'unité.

Coordination de l'axe Biogéochimie au CARTEL : Recours aux modèles lacustres comme outils fédérateurs (Figure 1). Depuis 2019, j'anime l'un des trois axes de recherche au CARTEL, dédié aux cycles biogéochimiques autour des lacs et leurs bassins versants ([URL](#)). La dimension intégratrice de mon projet de recherche m'a semblée en suffisamment bonne adéquation avec l'ambition de l'axe qui a pour but de mettre au point des approches pluridisciplinaires et fédératrices autour de l'objet lac et de la question des cycles géochimiques, ce qui m'a poussé à accepter d'être coordinateur de cet axe. Pour ce quinquennat,

l'idée générale de l'axe est ainsi 1) de recentrer les recherches autour des cycles des nutriments (C,N,P), 2) de s'ancre dans le cadre conceptuel des transferts et de la transformation biogéochimiques dans le continuum aquatique (land to ocean aquatic continuum – LOAC), et 3) de développer des méthodes d'intégration disciplinaire via la modélisation numérique centrée autour de l'objet lac et bassin versant. Les activités de l'axe consistent principalement en 1) la structuration de l'axe et de ses objectifs, 2) la conduite de réunions (1-2 par an), 3) à la mise à jour d'une page web sur le site de l'unité, 4) à l'organisation de journées de rencontre et réflexion autour de la thématique de l'axe et des interactions avec les autres axes, 5) incitation à la mise en place de projets collaboratifs pour développer l'intégration disciplinaire autour de l'objet lac et son bassin versant (e.g. projet PEPR FairCarboN). Les collègues concernés impliquent notamment V. Frossard (MCF), I. Domaizon (DR), D. Etienne (MCF), E. Lyautey (MCF), E. Dambrine (DR), V. Tran-Khac (IR), D. Jezequel (MCF), J. Guillard (IR), O. Itier-Desgué (IE), L. Soares (IR).

Coordination d'une équipe modélisation-archives (Figure 2). Bien qu'il n'y ait pas officiellement d'équipes au sein de CARTEL, je coordonne le développement de l'assimilation des modèles mécanistes et des archives sédimentaires grâce à des recrutements de CDD financés sur mes contrats : doctorant, postdoctorant, ingénieur d'étude, master. Ces financements ont permis plus spécifiquement le :

- *Démarrage d'un projet doctoral centré lac pour renforcer l'expertise en paléolimnologie de l'Unité: Je travaille avec Isabelle Domaizon sur le volet paléo-reconstruction, notamment avec le démarrage de la thèse de Julie Rotschi fin 2019 sur l'évolution du carbone et de la productivité primaire que j'ai élaboré avec Isabelle dans la continuité de la thématique carbone.*

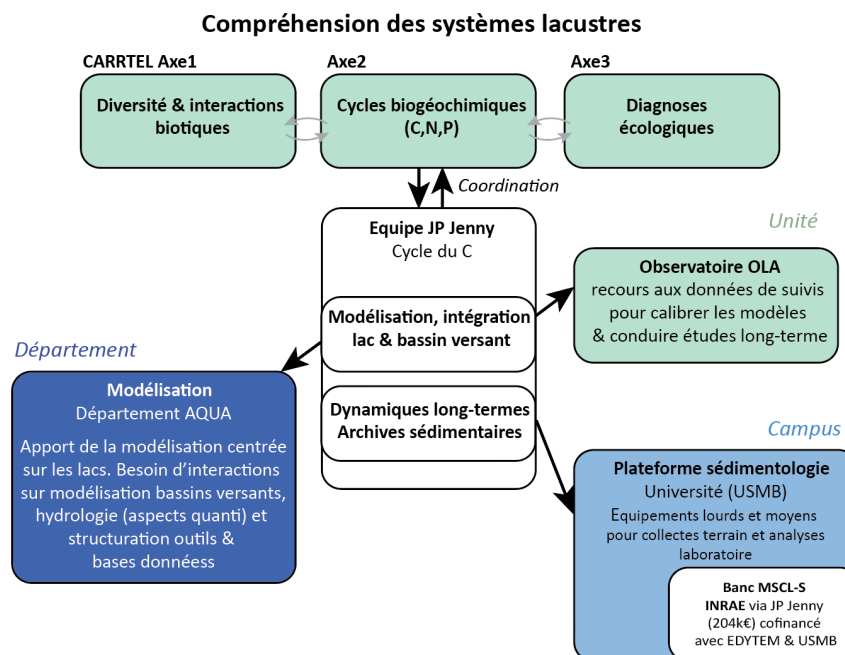


Figure 1. Positionnement de l'axe 2 et de mon équipe actuelle dans l'unité CARTEL, ses axes, le campus universitaire et le département INRAE-AQUA, autour du cycle du carbone, de l'intégration de la modélisation numérique (lacs et bassins versants) et de la paléolimnologie pour la compréhension des cycles sur le long-terme.

- **Enclenchement d'un projet doctoral de modélisation de l'érosion des sols des exports de C vers les lacs** : avec Patrick Durand (INARE), G-M Saulnier (EDYTEM) et Vincent Chanudet (EDF) sur la partie bassin versant. Un projet ANR C-ARCHIVES dont je suis porteur, validé en 2019, permet de développer le volet modélisation de l'érosion et des transferts de C du bassin versant (Thèse Théo Mazure).
- **Recrutement d'ingénieurs pour modéliser la dynamique biogéochimique lacustre** : L'objectif est d'améliorer les modèles existants pour les dynamiques long-termes (>100 ans) en confrontant les simulations aux reconstitutions paléo-environnementales. J'ai choisi de recourir à des modèles numériques existants et éprouvés du fonctionnement thermique (GLM et autres) et écologique (AED2) du lac (IE 9+6+6+10 mois Olivia Itier et IR 18 mois Laura Soares) qui permettent de conduire des prospectives du devenir des lacs pour un grand nombre de variables physiques (thermie), géochimiques (oxygène, pH...) et biologiques (Chla, diatomées, chlorophycés...).
- **Prolongation d'un postdoctorat pour 10 mois de modélisation avec les gestionnaire du lac Léman** : Dans le cadre des études déjà conduites sur les évolutions possibles des apports de phosphore (P) au lac, un travail de modélisation sur le devenir du P dans le lac a été engagé. L'objectif de ce travail est de préciser les conséquences de la mise en place de différents objectifs pour le P sur l'évolution de la distribution des stocks dissous de P dans la colonne d'eau, la productivité, les assemblages de phytoplancton et les conditions d'oxygénation.

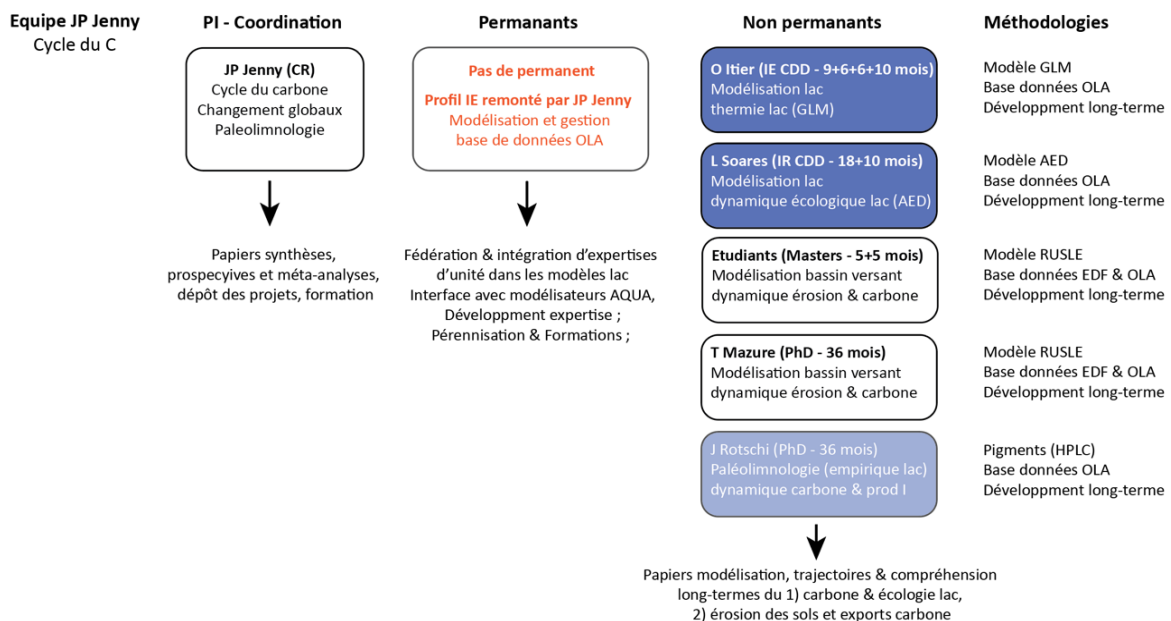


Figure 2. Zoom sur équipe JP Jenny - Structuration actuelle autour du cycle du carbone profond, de l'intégration de la modélisation numérique (lacs et bassins versants) et de la paléolimnologie pour la compréhension des cycles sur le long-terme. La constitution de l'équipe est financée sur les projets du coordinateur (via ANR, INRAE, AQUA, USMB, ECLA, FREE).

La création et la pérennisation d'une équipe (~5-6 personnes) pour l'intégration modèle-archives requiert des ressources et certains efforts. L'obtention de plusieurs bourses, dont ANR et avec trois gestionnaires, ont permis de mettre l'équipe sur pied. A ce stade, les membres de l'équipe permettent de

couvrir les aspects rétro-observation (recours aux archives sédimentaires) et modélisation (c.f. Figure 2). Une réflexion est en cours à l'échelle du laboratoire pour recruter un IE permanent sur les aspects modélisation (et base de données) pour aider aux phases de développement, mais surtout pour assurer la continuité entre les projets, ainsi que pour assurer l'interface avec les autres unités de recherches, notamment à AQUA, qui possèdent une forte expertise numérique et de modélisation.

Positionnement dans les autres réseaux

Je suis fortement impliqué dans le groupe « PAGES » (Past Global Changes) qui est un effort international rassemblant plus de 5,000 scientifiques dans +100 pays, visant à coordonner et à promouvoir la recherche paléo-environnementale (avec pour credo : *le passé est une clef pour comprendre l'avenir*). J'ai notamment participé à 6 workshops de PAGES sur les bases de données. Je suis particulièrement investi dans le groupe sur l'érosion des sols (GloSS) et sur les archives laminées annuelle Varve Working Group (VWG), mais aussi :

Depuis 2020 Membre IGBP - PAGES Human Traces, autour des premiers impacts humains

Depuis 2015 Membre IGBP - PAGES (Past Global Changes) Floods Working Group

Depuis 2015 Membre IGBP - PAGES Global Soil and Sediment transfers in the Anthropocene

Depuis 2015 Membre IGBP - PAGES Aquatic Transitions Group

Depuis 2013 Membre IGBP - PAGES Varve Working Group

Workshops internationaux en lien :

PAGES 1st meeting of the Human Traces group, 25-27 May 2021, Online workshop

PAGES 2nd meeting of the Global Soil and Sediment transfers group, 30-1 Feb 2017, Louvain, Belgium

PAGES 1st Regional Integration Group meeting, 30 Mai- 2 June 2016, Chambéry, France

PAGES 3rd Aquatic Transitions Group meeting, 26-28 April 2016, Maine, USA

PAGES Varve Working Group meeting, 17-19 June 2015, Gdansk, Poland

PAGES 1st meeting of the Global Soil and Sediment transfers group, 19-21 August 2015, Bonn, Germany

PAGES 2nd Aquatic Transitions Group meeting, 4-7 July 2015, Lanzhou, China

PAGES, 1st Aquatic Transitions Group meeting, 21-24 April 2015, Keyworth, Nottingham, UK

GLEON, 16th meeting of Global Lake Ecological Observatory Network, 27-31 Oct 2014, Orford, Canada

Autres groupes avec des interactions, mais moins actif :

Depuis 2014 Membre du GLEON (Global lake observatory network)

Depuis 2013 Membre du GEOTOP (Centre de recherche en géochimie et en géodynamique)

Section 1.6 - Publications

> 2300 citations, H-indice i10 : 25

Nombre d'ouvrages : (3 chapitres)

Nombre d'organisations de congrès de recherche : (2 chair et co-chair)

Nombre d'articles dans des revues à comité de lecture : (28 publiés, 5 en préparations)

Nombre de communications au niveau international avec comité de lecture : (>20)

Nombre de communications au niveau national avec comité de lecture : (>10)

Stratégie de publication

Les cinq dernières années ont été consacrées au développement d'une approche originale (couplage modèle & données paléolimnologiques pour analyser l'état, le fonctionnement et les services rendus par les lacs) qui a été soutenue essentiellement par les gestionnaires des lacs (CIPEL, SILA, Tignes, Pole ECLA). Les livrables pour cette période comprennent ainsi plusieurs rapports techniques. Deux articles de preuve de concept (Desgué-Itier et al. 2023 et Soares et al. 2024 accepté) ont permis plus spécifiquement de nous positionner dans le paysage scientifique, et de nous identifier comme précurseur de l'approche. Cette stratégie a été payante à mon sens car l'approche développée est en train de devenir une expertise reconnue propre au CARRTEL. Deux articles en préparation pour 2024 (Soares et al. en prep et Jenny et al. en prep) permettront de consolider ce positionnement. Les cinq prochaines années devraient voir paraître majoritairement des articles (et relativement moins de rapports) orientés recherche fondamentale, de valorisation des projets pilotés par CARRTEL dans le PEPR FairCarboN.

Liste des publications (Rang A)

Acceptés/soumis

A32. L. Soares, O Desgués-Itié, C Barouillet, D Bouffard, C Casenave, I Domaizon, V Frossard, N Hairston, A Lami, B. Lemaire, G Many, M-E Perga, G-M Saulnier, F Soullignac, B Vinçon-Leite, **Jenny JP** (2024). A crisis of lake hypoxia in the Anthropocene: The long-term effects of climate and nutrients. *Limnology and Ecology Letter* (Accepté)

A31. **Jenny JP**, L Millet, R Lauerwald, et al. (2024) DEEP-C Consortium: Carbon sink or methane source – local to global scale assessment of lentic waters' role in the climate system. *Research Ideas and Outcomes* (En révision)

A30. Barouillet C, E Capo, D Debroas, **JP Jenny**, P Sabatier and I Domaizon. Multifaceted biodiversity changes of lake microeukaryotic communities in response to nutrient-enrichment and climate change (Soumis)

Publiés / En ligne

A29. T Mazure, G-M Saulnier, V Chanudet, P Sabatier, M Bajard, F Arnaud, and **Jenny JP** (2024). Transient erosion crisis accounts for half of soil exports in the Alps during the Holocene. *The Holocene* <https://doi.org/10.1177/095968362412544>

A28. Desgué-Itier, O., L Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P. A., Domaizon, I., Guillard, J., Mazure, T., Sharaf, N., Soullignac, F., Tran-Khac, V., Vinçon-Leite, B., **Jenny JP**. (2023). Past and future climate change effects on thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *HESS*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-260>

A27. Banjan M, Christian C, Pierre S, Hervé J, Manon B, Francois D, Develle A, **Jenny JP**, Fanget B, Malet E, Nathaniel F, Alain P, Didier J, Bichet V, Clapot S, Messenger E (2023). Did the Younger Dryas to Holocene climate transition favour high seismicity rates in the north-western Alps? *Sedimentology* 70 (2), 538-568 <https://doi.org/10.1111/sed.13050>

A26. Baud A, **Jenny JP**, Francus, P. et al. Global acceleration of lake sediment accumulation rates associated with recent human population growth and land-use changes. *J Paleolimnol* 66, 453–467 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00217-6>

- A25. Nzekwe, O.P., Lapointe, F., Francus, P. **Jenny JP** et al. A new ~900-year varved record in Lake Walker, Québec North Shore, eastern Canada: insight on late Holocene climate mode of variability. *J Paleolimnol* 67, 35–57 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10933-021-00220-x>
- A24. Jane S, Hansen G, Kraemer B, Leavitt P, North R, Pilla R, Williamson C, Woolway R, Arvola L, Chandra S, DeGasperis C, Diemer L, Dunalska J, Erina O, Flaim G, Grossart HP, Hambright D, Hein C, Hejzlar J, Janus L, **Jenny JP**, Jones J, Knoll L, Leoni B, Mackay B, Matsuzaki S, McBride C, Muller-Navarra D, Paterson A, Pierson D, Rogora M, Rusak J, Sadro S, Saulnier-Talbot E, Schmid M, Sommaruga M, Thiery W, Verburg P, Weyhenmeyer G, Yokota K, Mincer J, Stetler J, Weathers K. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature Letter*. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
- A23. **Jenny JP**, O Anneville, F Arnaud, Y Baulaz, D Bouffard, I Domaizon, S A. Bocaniov, N Chèvre, M Dittrich, J-M Dorioz, E Dunlop, G Dur, J Guillard, T Guinaldo, S Jacquet, A Jamoneau, Z Jawed, E Jeppesen, G Krantzberg, J Lenters, B Leoni, M Meybeck, V Nava, T Nöges, P Nöges, M Patelli, V Pebbles, M-E Perga, S Rasconi, C R. Ruetz III, L Rudstam, N Salmaso, S Sapna, D Straile, O Tammeorg, M R. Twiss, D G. Uzarski, A-M Ventela, W F. Vincent, S W. Wilhelm, S-Å Wängberg, G A. Weyhenmeyer (2020) Scientists' Warning to Humanity: Rapid Degradation of the World's Large Lakes. *Journal of Great Lakes Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.006>
- A22. **Jenny JP**, S Koirala, I Gregory-Eaves, P Francus, B Ahrens, V Brovkin, A E. K. Ojala, B Zolitschka, J Bader, N Carvalhais (2020) Reply to Rao et al.: Human societies began to play a significant role in global sediment transfer 4,000 years ago *PNAS* doi: <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1908179116>
- A20. E. Taranu, SR. Carpenter, V Frossard, I Gregory-Eaves, **Jenny JP** et al. (2019) Can we detect ecosystem critical transitions and signals of changing resilience from paleo-ecological records? *Ecosphere* doi: <https://doi.org/10.1002/ecs2.2438>
- A20. **Jenny JP**, S. Koirala, et al. (2019) Human and climate global-scale imprint on sediment transfer during the Holocene. *PNAS* doi: <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1908179116>
- A19. G Evin, B Wilhelm, **Jenny JP** (2018) Flood hazard assessment of the Rhône River revisited with reconstructed discharges from lake sediments. *Global and Planetary Change* doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.09.010>
- A18. N Dubois, E Saulnier-Talbot, K Mills, P Gell, R Battarbee, H Bennion, S Chawchai, X Dong, P Francus, R Flower, D F. Gomes, I Gregory-Eaves, S Humane, G Kattiel, **Jenny JP**, et al. (2017) First human impacts and responses of aquatic systems: a review of palaeolimnological records from around the world. *The Anthropocene Review* doi: <https://doi.org/10.1177/2053019617740365>
- A17. Fabien A., J. Poulénard, C. Giguët-Covex, B. Wilhelm, **Jenny JP** et al., (2016) Erosion under climate and human pressures: An alpine lake sediment perspective. *Quaternary Science Reviews*. doi:10.1016/j.quascirev.2016.09.018
- A16. Lapointe F, P Francus, SF Lamoureux, M Vuille, **Jenny JP**, and R S. Bradley (2016) Influence of North Pacific Decadal Variability on the Western Canadian Arctic over the past 700 years. *Clim. Past Discuss* doi:10.5194/cp-2016-118
- A15. **Jenny JP** et al. (2016) Urban point sources of nutrients were the leading cause for the historical spread of hypoxia across European lakes. *PNAS* doi:10.1073/pnas.1605480113
- A14. M-E. Perga, S.C. Maberly, **Jenny JP** et al. (2016) A century of human-driven changes in the carbon dioxide concentration of lakes. *Global Biogeochemical Cycles* doi:10.1002/2015GB005286

- A13. **Jenny JP** et al., (2015) Global spread of hypoxia in freshwater ecosystems during the last three centuries is caused by rising local human pressure. *Global Change Biology* doi:[10.1111/gcb.13193](https://doi.org/10.1111/gcb.13193)
- A12. ME Perga, V. Frossard, **Jenny JP**, F. Sylvestre, et al., (2015) High-resolution paleolimnology opens new management perspectives for lakes adaptation to climate warming. *Front. Ecol.Evol* doi:[10.3389/fevo.2015.00072](https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00072)
- A11. Naffrechoux E, Cottin N, Pignol C, **Jenny JP** et al., (2015). Historical profiles of PCB in dated sediment cores from the greater French subalpine lakes (Geneva, Bourget and Annecy) : an indication of contamination source. *Environmental Science & Technology* doi:[10.1021/es5043996](https://doi.org/10.1021/es5043996)
- A10. **Jenny JP** et al. (2014). Inherited hypoxia : A new challenge for reoligotrophicated lakes under global warming. *Global Biogeochemical Cycles* doi:[10.1002/2014GB004932](https://doi.org/10.1002/2014GB004932)
- A9. **Jenny JP** et al., (2014) A 4D sedimentological approach to reconstructing the flood frequency and intensity of the Rhône River (Lake Bourget, NW European Alps). *J Paleolimnology* doi:[10.1007/s10933-014-9768-4](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9768-4)
- A8. Frossard V., Verneaux V., Millet L., **Jenny JP** et al., (2013) Reconstructing long-term changes (150 years) in the metabolism of a clearwater lake using the stable carbon isotope composition ($\delta^{13}C$) of chironomid and cladoceran subfossil remains. *Fresh Water Biology* doi:[10.1111/fwb.12304](https://doi.org/10.1111/fwb.12304)
- A7. Berthon V, Marchetto A, Rimet F, Dormia E, **Jenny JP**, Pignol C, Perga ME (2013) Trophic history of French sub-alpine lakes over the last 150 years : phosphorus reconstruction and assessment of taphonomic biases. 72(3) : 417-429, *Journal of Limnology* doi:<http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2013.e34>
- A6. Frossard V, Verneaux V, Millet L, **Jenny JP** et al., (2013) Depth-specific responses of the chironomid community to contrasting anthropogenic pressures : A paleolimnological perspective of 150 years. *Freshwater Biology*. *Freshwater Biology* doi:[10.1111/fwb.12243](https://doi.org/10.1111/fwb.12243)
- A5. **Jenny JP** et al.,(2013) A spatiotemporal investigation of varved sediments highlights the dynamics of hypolimnetic hypoxia in a large hard-water lake over the last 150 years. *Limnology and Oceanography* doi:[10.4319/lo.2013.58.4.1395](https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.4.1395)
- A4. Frossard V, Millet L, Verneaux V, **Jenny JP** et al., (2013) Chironomid assemblages in cores from multiple water depths reflect oxygen-driven changes in a deep French lake over the last 150 years. *Journal of Paleolimnology* doi:[10.1007/s10933-013-9722-x](https://doi.org/10.1007/s10933-013-9722-x)
- A3. Giguët-Covex C, Poulénard J, Chalmin E, Arnaud F, **Jenny JP**, Dorioz JM (2013) XANES spectroscopy as a tool to trace phosphorus transformation during soil genesis and mountain ecosystem development from lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.04.017>
- A2. Alric B, **Jenny JP** et al., (2013) Local forcings affect lake zooplankton vulnerability and response to climate warming. *Ecology* doi:[10.1890/12-1903.1](https://doi.org/10.1890/12-1903.1)
- A1. Savichtcheva O, Debroas D, Kurmayer R, Villar C, **Jenny JP**, Arnaud F, Perga ME, Domaizon I (2011) Quantitative PCR Enumeration of Total/Toxic Planktothrix rubescens and Total Cyanobacteria in Preserved DNA Isolated from Lake Sediments. *Appl Environ Microbiol* doi:[10.1128/AEM.06106-11](https://doi.org/10.1128/AEM.06106-11)

Rapports de recherche pour les gestionnaires des lacs

L. Soares, O Desgués-Itié, V Frossard, I Domaizon, V Tran Khac, **Jenny JP**. 2024. Quel nouvel objectif phosphore pour le lac Léman ? Rapport d'étude pour la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman (CIPEL), Inrae (France), 60 pages

L. Soares, O Desgués-Itié, V Frossard, C Barouillet, I Domaizon, JM Dorioz, C Goulon, J Guillard, S Jacquet, e Réalis, V Tran Khac, **Jenny JP.** 2024. Prospective des effets du changement climatique sur le lac d'Annecy : Tendances et défis à venir concernant les services rendus. Rapport d'étude pour le *Syndicat Mixte du Lac d'Annecy (SILA)*, Inrae (France), 73 pages

O Desgués-Itié, L. Soares, V Frossard, **Jenny JP.** 2024. Prospective et effets des changements climatiques sur le lac de Tignes à l'horizon 2100. Rapport d'étude pour la *Commune de Tignes*, Inrae (France), 50 pages

Jenny JP., J.-N. Avrillier, S. Cachera, C. Costel, L. Crépin, O. Itier-Desgué, C. Goulon, J. Guillard, V. Hamelet, J.C. Hustache, S. Jacquet, L. Laine, P. Perney, P. Quéting, J. Raphy, C. Rautureau, F. Rimet, S. Rasconi, V. Tran-Khac. 2024. Suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2023. Rapport INRAE-CISALB, 101 pages.

Jenny JP., D. Jezequel, J.-L. Loizeau, F. Soullignac, J.-C. Hustache, 2024. Etude de la zone anoxique au fond du Léman. Rapport d'étude pour la *Commission internationale pour la protection des eaux du Léman (CIPEL)*, Inrae (France), 10 pages

Ouvrages complets et/ou direction d'ouvrages ou d'actes

[Ouvrage] Jean Marcel Dorioz, Orlane Anneville, Isabelle Domaizon, Chloé Goulon, Jean Guillard, Stéphan Jacquet, Bernard Montuelle, Serena Rasconi, Viet Tran Khac, **Jean-Philippe Jenny** (2023-03-01). *Les grands lacs à l'épreuve de l'anthropocène*. <https://hal.inrae.fr/hal-04017677>

Conférences

Conférences invitées

Jenny, J.-P. Exploring Human-Induced Perturbations in Holocene Lateral Carbon Fluxes through Lake Sediment Archives. *Workshop Cland on Lateral C transfers*, 26 fév 2024, Paris Saclay. – Invited speaker ([URL](#))

Jenny, J.-P., Implementing Lake Observatories with long-term integrative approaches: an Alpine perspective? EAWAG workshop, Switzerland – Invited speaker

Jenny, J.-P., Soares, L. M. V., Mazure, T., and Desgué-Itier, O.: Unraveling Temporal Complexities in Lake Science through Sediment Records and Process-Based Models, EGU General Assembly 2024, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-20515, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-20515>, 2024 – First session speaker

Conférences

L Soares, O Desgué-Itier, I Domaizon, C Barouillet, **Jean-Philippe Jenny**. Integration of lake modeling and paleolimnological records to perform long-term simulations of water quality in Lake Geneva over 250 years (1850–2100 period). EGU 2023 General Assembly Conference, Abstracts, 11679, Vienna, Autriche [10.5194/egusphere-egu23-15778](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15778)

Olivia Desgué-Itier, Laura Melo Vieira Soares, Orlane Anneville, Damien Bouffard, Vincent Chanudet, Pierre-Alain Danis, Isabelle Domaizon, Jean Guillard, Théo Mazure, Najwa Sharaf ... **Jean-Philippe Jenny** (2022-08-07). *Past and future climate change effects on thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes*. Presented at : SIL 2022 - 36th Congress of International Society of Limnology, Berlin, Allemagne (2022-08-07 - 2022-08-10), <https://hal.inrae.fr/hal-03961108>

Mathilde Banjan, Christian Crouzet, Pierre Sabatier, Hervé Jomard, François Demory, Anne-Lise Develle, **Jean-Philippe Jenny**, Erwan Messenger (2021-11-01). *Le lac d'Aiguebelette, une archive de la sismicité dans les Alpes françaises depuis la dernière période glaciaire*. Presented at : 27e édition de la Réunion des Sciences de la Terre, Lyon, France (2021-11-01 - 2021-11-05), <https://hal.inrae.fr/hal-03588035>

Jean-Philippe Jenny, C Niemann, P Francus, A Noren, N Carvalhais (2020-05-04). *A meta-analysis of paleolimnological records reveals the sensitivity of lacustrine carbon burial rates to carbon sources and preservation conditions during the Anthropocene*. Presented at : EGU General Assembly Conference, Abstracts, 11679, Vienna, Autriche (2020-05-04), <https://hal.inrae.fr/hal-03079925>, OA

Jean-Philippe Jenny, C. Niemann, Alexandre Baud, Irene Gregory-Eaves, P. Francus, Anders Noren, N. Carvalhais (2019-04-07). *Relation between erosion and carbon transfers in 420 lake watersheds of the world during the last 300 years: a paleolimnological study*. Presented at : Geophysical Research Abstracts 21, Vienna, Autriche (2019-04-07), <https://hal.inrae.fr/hal-03080010>, OA

Théo Mazure, Georges-Marie Saulnier, Florence Mazier, Maria Antonia Serge, Erwann Messenger, F Arnaud, **Jean-Philippe Jenny** (2022-11-27). *Quantifying soil erosion during the Holocene by coupling land surface modeling and paleoenvironmental approaches*. Presented at : IAL-IPA Joint Meeting 2022, San Carlos de Bariloche, Argentine (2022-11-27 - 2022-12-01), <https://hal.inrae.fr/hal-04230753>

Théo Mazure, Georges-Marie Saulnier, Florence Mazier, Maria Antonia Serge, Erwan Messenger, Fabien Arnaud, **Jean-Philippe Jenny** (2022-11-27). *Quantifying soil erosion during the Holocene by coupling land surface modeling and paleoenvironmental approaches*. Presented at : Lakes, Memories of the Landscape AL-IPA Joint Meeting 2022, San Carlos de Bariloche, Argentine (2022-11-27 - 2022-12-01), <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7305148>, <https://hal.inrae.fr/hal-04230682>

Mathilde Banjan, Christian Crouzet, Pierre Sabatier, Hervé Jomard, François Demory, Anne-Lise Develle, **Jean-Philippe Jenny**, Nathaniel Findling, Philippe Alain, Erwan Messenger (2021-04-19). *Did the Late Glacial to Holocene climatic transition trigger large earthquakes in the Western Alps?*. Presented at : EGU 2021, Vienne, Autriche (2021-04-19), <https://dx.doi.org/10.5194/egusphere-egu21-901>, <https://hal.inrae.fr/hal-03547724>

Guillaume Evin, Bruno Wilhelm, **Jean-Philippe Jenny** (2018-01-15). *Bayesian MCMC flood frequency analysis with reconstructed paleofloods*. Presented at : Symposium on Uncertainty Quantification in Computational Geosciences, Orléans, France (2018-01-15 - 2018-01-17), <https://hal.inrae.fr/hal-01984904>

Posters

T Mazure, Georges-Marie Saulnier, Florence Mazier, Maria Antonia Serge, Erwann Messenger, F Arnaud, **Jean-Philippe Jenny** (2022-10-06). *Quantifying soil erosion during the Holocene by coupling land surface modeling and paleoenvironmental approaches*. Presented at : 4èmes Journées De Modélisation Des Surfaces Continentales, Grenoble, France (2022-10-06 - 2022-10-07), <https://hal.inrae.fr/hal-04230819>

Théo Mazure, Georges-Marie Saulnier, Florence Mazier, Maria Antonia Serge, Erwan Messenger, Fabien Arnaud, **Jean-Philippe Jenny** (2022-10-06). *Quantifying soil erosion during the Holocene by coupling land surface modeling and paleoenvironmental approaches*. Presented at : 4èmes Journées De Modélisation Des Surfaces Continentales, Grenoble (38000), France (2022-10-06 - 2022-10-07), <https://hal.inrae.fr/hal-04230695>

Jeux de données

Soares, L. M. V.; Desgué-Itier, O; Barouillet, C; Casenave, C; Domaizon, I; Frossard, V; Hairston Jr., Nelson G; Lami, A; Lemaire, B J.; Saulnier, G-M; Soullignac, F; Vinçon-Leite, B; **Jenny J-P**, 2024, "Simulated daily water oxygen time series data (full water profile) for lake Geneva over the period 1850-2100, based on IPCC ssp126, ssp370 and ssp585 scenarios.", <https://doi.org/10.57745/L4RABJ>

O Desgue, MV Soares, Laura, O Anneville, D Bouffard, V Chanudet, ... **Jenny J-P**. *Simulated daily water temperature time series data (full water profile) for lakes Geneva, Annecy, Bourget and Aiguebelette over the period 1850-2100, based on IPCC ssp126 ...* <https://doi.org/10.57745/PA13OK>

Jenny J-P, 2021, "Time series dataset of dissolved oxygen, water temperature and Secchi depths profiles in Lakes Annecy and Geneva", <https://doi.org/10.15454/BUJUSX>

Fiche Synthèse

Jean-Philippe JENNY

Chargé de Recherche CRCN

INRAE USMB UMR CARTELE
BP 511, 74203 Thonon Cedex, France
Tél : +33 (0)4 79 75 86 49

Né le 27 Mars 1984
à Lille (59)

Courriel: Jean-Philippe.Jenny@inrae.fr

PARCOURS, PROJETS ET ENCADREMENTS D'ÉTUDIANTS

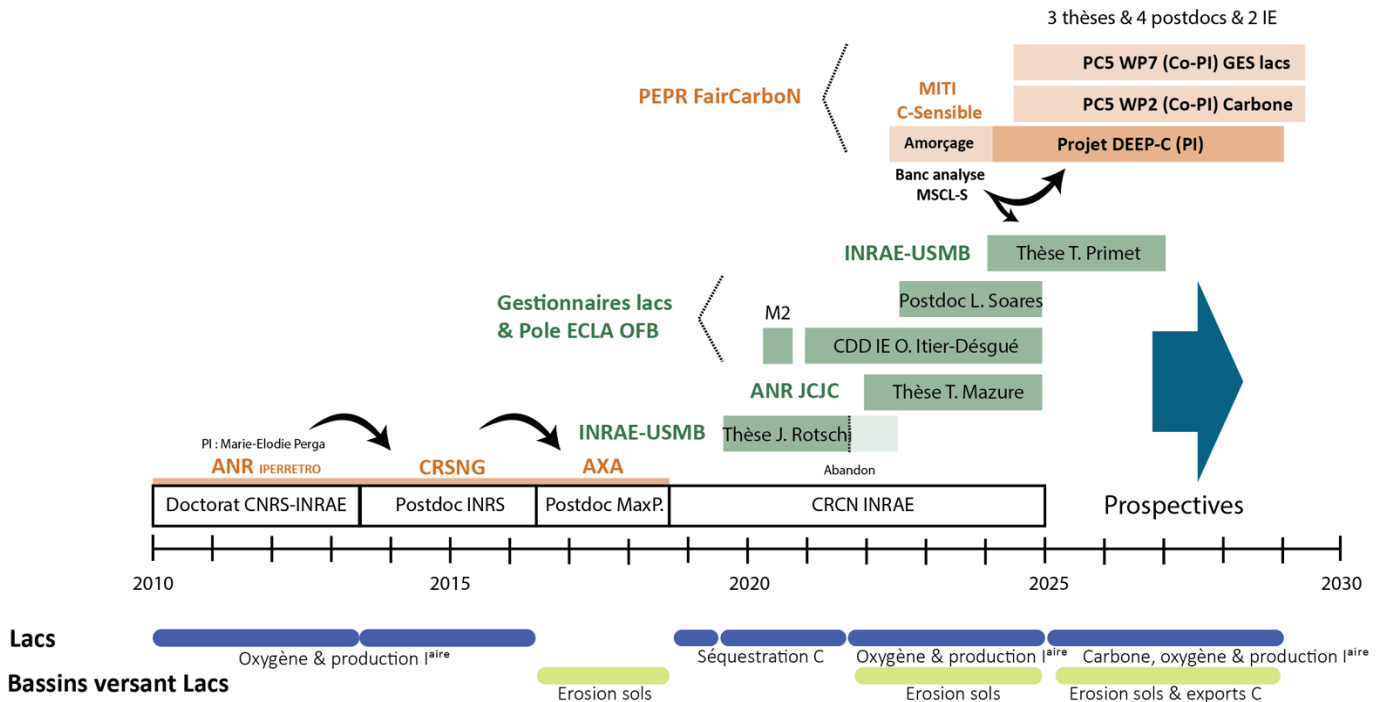


Figure 3. Parcours et articulation des activités de recherche opérationnelles (en vert) et fondamentales (orange). Les objets d'étude autour des bassins versant lacs sont identifiés : les lacs en bleu et les bassins versants lacustres en vert clair, avec une intégration des deux composant dans le PEPR. Les 9 M2 et 1 M1 encadrés en tant que principal encadrant ne sont pas indiqués ici.

PUBLICATIONS, EXPERTISE & COORDINATION

Publications : H-index i10 : 25, > 2300 citations, (3 PNAS, 1 Nature) – **1 article fédérateur :** Jenny JP, S. Koirala, et al. (2019) Human and climate global-scale imprint on sediment transfer during the Holocene. PNAS doi: <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1908179116>

Expertise : **1)** Depuis 2021 : Membre du comité scientifique de la CIPEL ([URL](#)) Commission internationale pour la protection des eaux du Léman. **2)** Rédaction de 4 rapports à destination des gestionnaires des lacs (CIPEL, SILA, Tignes) concernant des études prospectives des impacts du changement climatique sur le fonctionnement et les services écosystémiques rendus.

Coordination : 2020-2025 Coordinateur de l'axe Lake Biogeochemistry au CARTELE ([URL](#)) et d'une équipe sur la thématique de la séquestration du carbone par les lacs à l'Anthropocène

Awards : 2018 Early Career Awards – International Paleolimnology Association, Stockholm, 21 June 2018 ([URL](#))

Participation au développement d'une plateformes sédimentaire à USMB pour les études paleo-environnementales (~200k€ en partenariat avec USMB et CNRS-EDYTEM pour acquisition d'un scanner MSLC en 2021).

Volet 2 Synthèse des Activités de Recherche

Section 2.1 Introduction et contexte scientifique

1. *Propos liminaires*

Mes travaux visent à approfondir les recherches sur les transferts et la transformation du carbone (C) sur le temps long, à la fois dans les systèmes lac-bassin versants et plus globalement le long du continuum terre-zone côtière-atmosphère (LOAC). L'originalité de mon approche consiste à coupler l'utilisation d'archives sédimentaires lacustres de résolution annuelle, les données de suivis limnologiques et la modélisation numérique pour reconstituer un signal sur le temps long, et à raisonner à l'échelle des systèmes lacs - bassin versants, considéré dans mes recherches comme unité spatiale de référence et observatoire privilégié des changements dans le LOAC. Dans cette optique, les lacs sont considérés comme intégrateurs des flux de matière des bassins versants tandis que les sédiments lacustres sont considérés comme des archives géologiques permettant de retracer l'évolution temporelle des flux, stocks, sources, et des contrôles. Cette approche offre une perspective stratégique pour étudier l'évolution du cycle du carbone continental au cours de l'Anthropocène.

Mes travaux se sont intéressés plus spécifiquement à la reconstitution des deux sources principales de carbone sédimentaire lacustre : 1) les apports allochtones de C liés issues de l'érosion des sols dans les bassins versants, et 2) les apports autochtones de carbone issus de la production primaire lacustre. J'explore les évolutions temporelles des conditions d'oxygène lacustre et son rôle dans la préservation sédimentaire du carbone. Ce volet sur l'oxygène est très présent dans mes recherches car il fournit une continuité depuis mon doctorat et me permet d'étudier une réponse « intégratrice » du milieu, c.-à-d. liant de nombreux processus et flux internes au lac, externes, afin d'aborder de manière relativement englobante le fonctionnement général lacustre. Ma recherche est fortement interdisciplinaire pour aborder les différentes facettes du cycle du carbone dans les systèmes lac-bassin versants, le calcul des bilans, la variabilité et l'importance des contrôles dans le cycle du carbone à l'Anthropocène.

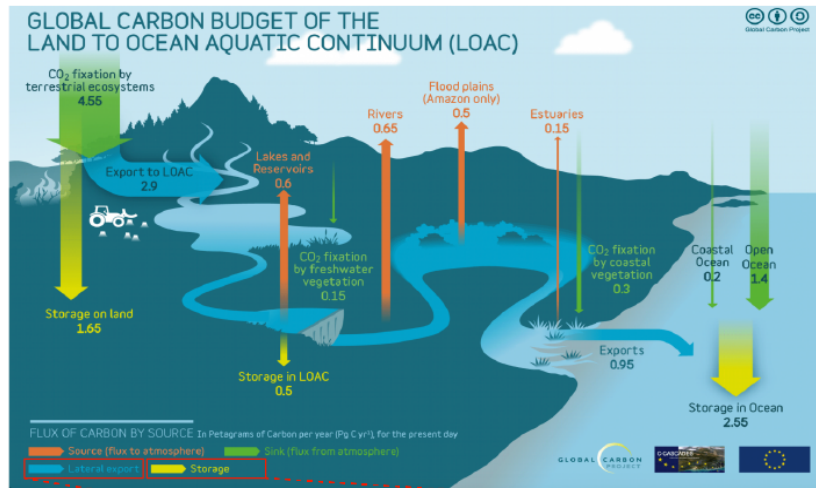
Mes démarches ces cinq dernières années ont eues pour but de :

- 1) développer une approche adaptée à l'étude de la dynamique long-terme du cycle du carbone lacustre
- 2) constituer une équipe pour couvrir et conduire les différents axes de ma recherche
- 3) s'implanter dans l'unité, le campus Technolac et le département AQUA-INRAE
- 4) murir un projet autour d'un consortium national sur le cycle du carbone lacustre

Mon cadre conceptuel se rapporte désormais aux transports et à la transformation de la matière dans le continuum aquatique (LOAC), concept développé par P Reignier pour pallier le manque de représentations encore en 2013 des transferts latéraux du carbone dans le cycle continental du C (généralement centré sur les interactions biosphère terrestre-atmosphère) (Figure 4) (Reignier et al., 2013a). Mon effort se concentre actuellement sur l'organisation et la valorisation de données issues d'archives sédimentaires lacustres, sur l'intégration de données d'observation régionales et mondiales,

grâce à un couplage entre deux modèles numériques (actuellement dédiés spécifiquement aux lacs et aux bassins versants). Je cherche principalement à déterminer le bilan de séquestration sédimentaire de C par les lacs en Europe et dans le monde, à identifier l'évolution des sources du C (terrestres ou aquatiques), et à analyser les causes et les processus responsables de la variabilité long-terme de la séquestration du C (Figure 4). Une nouvelle composante sur les émissions de CO₂ et CH₄ sera discuté dans le chapitre perspectives.

a. Estimations actuelles des transferts de carbone



b. Intégrer les variations/sensibilités passées

Points d'innovation de cette étude:

1. Variations long-terme (centaines, milliers d'années)
2. Changements globaux dans les exports latéraux et stockage lacustre de C
3. Facteurs de control pour les échelles centenales & millénaires
4. Sensibilité des exports long-terme de C aux variations d'érosion des sols

Cette étude

Temps

Figure 4. Concept des transferts et de la transformation de carbone dans le continuum terre-mer (aka LOAC) qui importent pour le cycle global du carbone (Regnier et al., 2013a). Cette approche conceptuelle est actuellement transposée dans mon projet de recherche pour investiguer les variations passées de 1) la stabilité des stocks récemment formés dans les sédiments lacustres, 2) la variation dans les exports de C et le lien avec les variations dans les taux d'érosion, 3) la variation dans les stocks de carbone sédimentaire, et indirectement des sols, 4) la variation dans les facteurs de forçage qui contrôle ces stocks.

Rappel des questions et objectifs

Mon travail vise une meilleure compréhension et modélisation des interactions entre dynamique des transferts sédimentaires et le cycle du C des bassins hydrographiques. Ci-dessous sont présentés les principales questions adressées dans les premières années du projet.

- Q1 : Quelle est l'évolution de la séquestration du C par les lacs sur les échelles de temps longues ?
- Q2 : Quelles sont les sources de carbone qui contribuent à la séquestration du C lacustre ?
- Q3 : Quels sont les mécanismes qui contrôlent les transferts et la séquestration du C à long terme ?

Pour répondre à ces questions relativement générales, mon objectif depuis 2018, date de recrutement à INRAE, est de développer une approche intégrée du cycle du carbone, incluant lac et bassin

versant, reposant sur les archives sédimentaires et la modélisation. Le défi méthodologique consiste à recourir et à terme à coupler deux modèles permettant de décrire et de quantifier 1) l'influence des changements du paysage et du climat sur l'évolution des transferts de carbone des sols vers les milieux lacustres (érosion/ export, **Modèle semi-empirique d'érosion RUSLE revisité**) et 2) le fonctionnement lacustre, incluant production primaire et les conditions de séquestration sédimentaire du C par les lacs – **Modèle mécaniste hydrodynamique et écodynamique** *General Lake Model* (GLM) et l'Aquatic EcoDynamics lake model (AED2) qui intègrent de nombreux processus lacustres. Ces deux représentations ont été adapté aux échelles de temps long et développé en parallèle avec mon équipe. L'échelle de temps visée va de deux ou trois siècles à plusieurs millénaires, c'est-à-dire approximativement la période de l'Anthropocène comprenant à la fois une base non (ou peu) perturbée par les activités humaines, et une période d'intensification de la pression humaine. Ce recul permet notamment de caractériser les conditions de base non perturbées, de quantifier les perturbations anthropiques, d'identifier les points de bascule dans les systems aquatiques et terrestres. Ce recul permet en outre de questionner les échelles spatiales et temporelles pertinentes d'étude dans le cas du cycle du carbone et vis à vis des défis climatiques. La base de données de l'Observatoire des Lacs (OLA) du CARTEEL permet de calibrer ces modèles pour les lacs alpins et de tendre vers une intégration des échelles temporelles pour une meilleure compréhension des processus et des forçages. Je compte ainsi produire de nouvelles séries temporelles longues avec deux approches complémentaires, pour une plus grande fiabilité des reconstitutions passées, et pour répondre à des questions encore peu comprises sur le cycle du carbone. Les projets en cours (Section 1.3) m'ont permis de réaliser les preuves de concept quant à la possibilité, grâce aux modèles numériques, de renforcer les interactions disciplinaires autour de l'objet lac.

Je me présente ainsi en tant que paléolimnologue ayant recours aux archives sédimentaires, aux outils de datation et aux marqueurs biogéochimiques, pour reconstituer et analyser les changements passés du cycle du carbone et des nutriments, et des effets sur l'état et de fonctionnement des lacs soumis aux changements climatiques et aux activités anthropiques. L'intégration d'outils de modélisation mécanistes depuis cinq ans me permet d'apporter une dimension quantitative et prospective des processus, de l'état et du fonctionnement des lacs.

Mon approche permet à la fois des analyses rétrospectives et des projections futures, répondant ainsi aux besoins opérationnels des gestionnaires des lacs tout en facilitant le dialogue entre la communauté de paléolimnologie et les modélisateurs du cycle global du carbone et du climat.

2. Contribution des lacs dans le cycle global du carbone

Contexte d'urgence climatique et enjeux liés au cycle du carbone

Le carbone est désormais au centre des préoccupations sociétales, en particulier en raison de la reconnaissance du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄) comme acteurs majeurs dans le bilan énergétique terrestre et comme principaux gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique actuel. Cette prise de conscience a conduit à un intérêt croissant de la communauté scientifique pour

l'étude du cycle mondial du carbone, ainsi que pour la compréhension de ses sources et puits. Dès le cinquième rapport d'évaluation (AR5) publié en 2013, le GIEC a souligné l'importante contribution des eaux intérieures (i.e. ruisseaux, rivières, lacs et réservoirs) au budget mondial des gaz à effet de serre, ces dernières étant des sources de gaz à effet de serre (GES) vers l'atmosphère (IPCC, AR5 2013). Cependant, malgré cette reconnaissance, les émissions des eaux intérieures demeurent la principale source d'incertitude dans le bilan mondial de la séquestration et des émissions de GES, notamment du méthane (Canadell et al., 2011). Parmi ces eaux, les lacs sont particulièrement intéressants en raison de la qualité exceptionnelle de leurs archives géologiques. Cependant, leur rôle net en tant que source ou puits de carbone demeure à préciser, surtout sur de longues échelles temporelles qui prennent en compte les cycles du carbone à court et long du carbone.

La place des plans d'eau dans le cycle du carbone et du climat mondial

La grande diversité des lacs dans le monde rend l'analyse de leur rôle sur le cycle du carbone global particulièrement difficile. Leur abondance actuelle, avoisinant les 1.4 million pour les plans d'eau >10ha (Messenger et al., 2016, Figure 5), confère en outre aux lacs un rôle conséquent dans les échanges de carbone avec l'atmosphère. Les lacs sont des réacteurs biogéochimiques recevant du carbone (C) fixé à l'origine par la biosphère terrestre et aquatique, qui est ensuite enfoui dans les sédiments, entrant ainsi dans le cycle géologique à long terme, et/ou renvoyé dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et de CH₄, un gaz à effet de serre (GES) dont l'effet de réchauffement est 80 fois plus puissant que celui du CO₂ sur une période de 20 ans (Holgerson and Raymond, 2016; Tranvik et al., 2018). Les lacs fixent en outre une quantité importante de carbone atmosphérique par la photosynthèse et contribuent également au transport de la matière organique dissoute vers le système hydrographique et vers les océans, où elle peut être remobilisée ou stockée pendant de longues périodes.

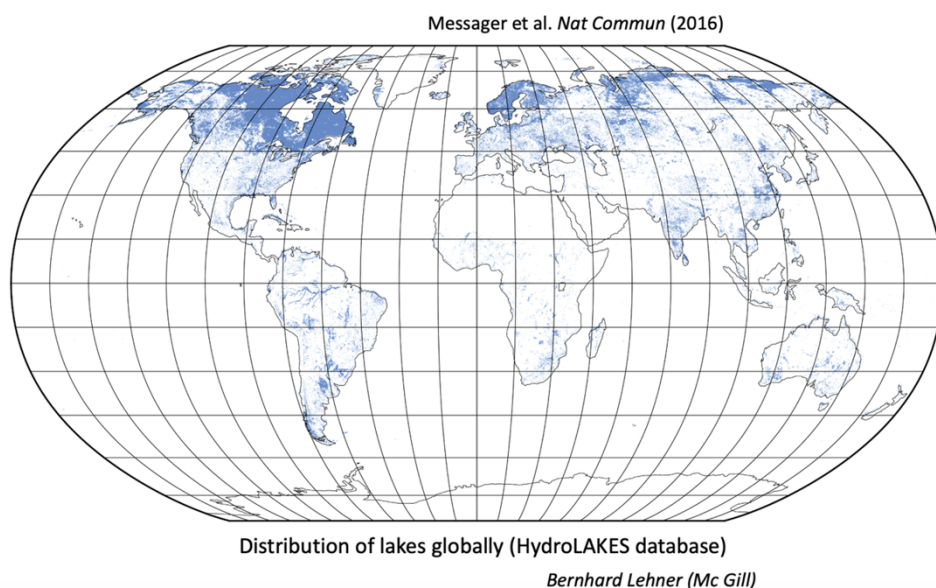


Figure 5. *Distribution des lacs dans le monde (données issues de Messenger et al. Nat Communication 2016)*

Globalement, les lacs ont un effet disproportionné sur le cycle mondial du carbone (C) malgré leur relative faible superficie totale. La majorité des lacs sont sursaturés en dioxyde de carbone (CO_2), avec des concentrations pouvant dépasser plusieurs fois la concentration d'équilibre, et sont donc des sources de carbone dans l'atmosphère (Cole et al., 1994). Les estimations mondiales des émissions de CO_2 lacustres se situent autour de 0.53 Pg de carbone par an (Tranvik et al., 2009). Les estimations des émissions de CH_4 sont quant à elles plus faibles, comportent plus d'incertitudes, et représenteraient de l'ordre de 8 à 48 téragrammes de carbone par an (Bastviken et al., 2004). Parallèlement, en raison de leur capacité à stocker du C dans les sédiments, les plans d'eau sont potentiellement d'importants puits de C, mais l'ampleur de cette accumulation reste également mal quantifiée, avec des estimations globales se situant entre 0.06 and 0.25 Petagramme (Pg) de carbone organique par an (Anderson et al., 2020, Tranvik et al. 2009). L'impact du cycle du C dans les plans d'eau sur le système climatique dépend largement du ratio entre le stockage net de C dans les sédiments en tant que puits de CO_2 à long terme et les émissions de CO_2 et le CH_4 (Prairie et al., 2018, et Figure 6), tous deux reconnus comme des incertitudes clés dans les derniers rapports d'évaluation du GIEC (e.g. Canadell et al., 2021). **Il est donc crucial d'améliorer les estimations à la fois des émissions de GES que de la séquestration du carbone pour mieux connaître le rôle des plans d'eau dans le cycle global du carbone et dans le système climatique actuel.**

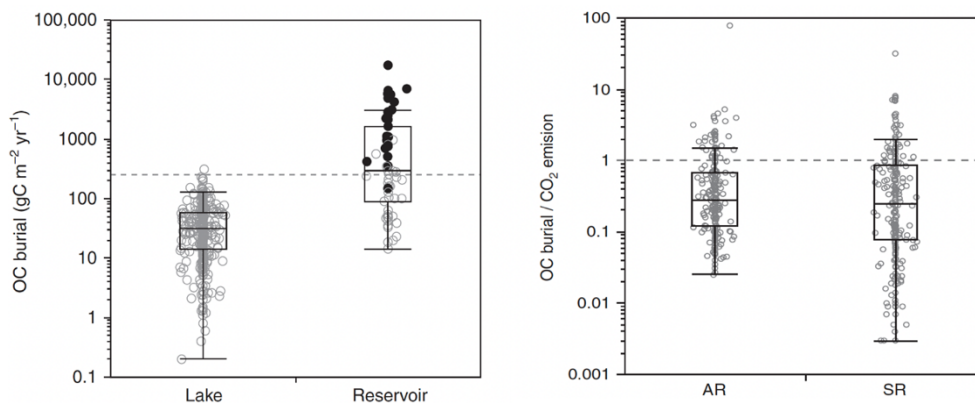


Figure 6. Taux actuels d'accumulation et des émissions de carbone dans les lacs et les réservoirs - Estimation mondiale annuelle de l'accumulation du carbone organique : 0,15 [0,06-0,25] Pg de carbone, dont environ 40 % est stocké dans les réservoirs. Mendoza et al. Nat Comm (2017)

Des échelles de temps qui conditionnent le rôle de source ou de puit de C des lacs

Les flux (émissions de GES et accumulation sédimentaire de carbone) sont influencés par les apports terrestres allochtones de C et de nutriments, ainsi que par leurs perturbations anthropiques (Heathcote et al., 2013; Tranvik et al., 2009). Bien que les taux d'accumulation de carbone dans les lacs soient souvent faibles comparés aux émissions, ils représentent un puits significatif à long terme, plus efficace que les océans en raison de la sédimentation rapide et de la faible oxygénation des eaux. Ainsi, la séquestration sédimentaire dans les lacs constitue un puits de carbone géologique dépendant des apports terrestres et des conditions aquatiques.

Cependant, si les données pour caractériser les flux actuels des plans d'eau sont sporadiques, ces données sont encore bien plus lacunaires pour documenter les changements passés, notamment concernant les émissions de GES sur des échelles pluri-décennales à centennales, car la communauté ne dispose pas encore actuellement de marqueurs paleo-environnementaux fiables ou généralisables. Ce manque de données rend difficile la compréhension de l'évolution des lacs entre des phases d'émission de CO₂ et de CH₄ ou de séquestration, limitant notre capacité à prévoir leur impact climatique futur. **De nouvelles études pour densifier les mesures d'accumulation de carbone sédimentaire passés et des sources (Henry et al., 2024), mais aussi pour proposer des pistes pour reconstituer les émissions de GES passés des lacs à différentes échelles temporelles sont nécessaires pour mieux comprendre leur rôle en tant que source ou puits de carbone**(Regnier et al., 2013b). Ce recul temporel aura notamment pour but de d'estimer la contribution anthropique pour discerner la part naturelle et perturbée du cycle du carbone lacustre.

La planète compte plus d'1,4 million de lacs d'une superficie supérieure à 10 hectares. Nous vivons à une époque que l'on pourrait qualifier « Âge des Lacs », caractérisée par une abondance de ces étendues d'eau. L'histoire des lacs remonte à environ 11 000 ans, à la fin de la dernière ère glaciaire du Pléistocène. Bien que cela puisse sembler lointain, il est intéressant de noter que près de 50% la superficie totale des lacs aujourd'hui, soit environ 1 250 000 km², provient de l'héritage laissé par le retrait des glaces (Bengtsson et al., 2012). Cette tendance s'accélère actuellement en raison du changement climatique, notamment de la fonte des glaciers en haute altitude et dans les régions polaires. Le nombre de lacs glaciaires (>0,05 km²) à l'échelle mondiale a augmenté de 53 % entre 1990 et 2018, pour atteindre 14 394 (Shugar et al., 2020) (Bosson et al., 2023). **Il est donc légitime de considérer que compte tenu de leur abondance actuelle, les lacs occupent une place centrale dans les cycles hydrologiques et biogéochimiques de surface, en particulier à l'époque de l'Anthropocène.**

La part des eaux continentales dans l'évaluation du stockage de carbone terrestre

Les systèmes aquatiques continentaux agissent comme des "conduits actifs" (c.f. active pipe) du transport latéral de carbone depuis les écosystèmes terrestres vers les milieux aquatiques, et ils sont désormais reconnus comme un élément important du cycle mondial du carbone (Holgerson and Raymond, 2016; Tranvik et al., 2018). Pendant longtemps, les modèles mondiaux du cycle du carbone n'ont pris en compte que les échanges gazeux verticaux entre les réservoirs terrestres ou océaniques et l'atmosphère, ne tenant ainsi pas compte du transport latéral du carbone depuis les continents vers les eaux intérieures et les océans (Nakhavali et al., 2018; Regnier et al., 2013b, Figure 7). Par conséquent, ces modèles ont implicitement considéré que tout le carbone qui n'est pas respiré dans l'atmosphère est stocké sur terre,

surestimant ainsi la capacité du sol à piéger le carbone. En réalité, une partie du carbone absorbé sous forme de CO₂ par les écosystèmes terrestres est transportée vers les milieux aquatique et l'océan au travers du « **continuum aquatique terre-océan** » (LOAC) (Lauerwald et al., 2017, 2020; Regnier et al., 2022) et peut retourner dans l'atmosphère ou être piégé dans les sédiments à chaque étape de son parcours. Le transport latéral et la transformation du carbone le long du LOAC impliquent des processus naturels qui ont été fortement perturbés par les activités humaines^{8,14,17}. Des programmes récents (par exemple, MC H2020 C-CASCADES) ont apporté d'importantes avancées dans l'étude du carbone dans le continuum aquatique afin de prendre en compte les transferts latéraux et de fournir des mesures réalistes sur de vastes régions géographiques. **La connaissance du transport latéral de carbone et de la redistribution du C par le LOAC est nécessaire pour séparer les flux aquatiques propres et les flux qui doivent être imputés aux écosystèmes terrestres.** Cette connaissance est également nécessaire pour séparer les flux naturels et anthropiques des flux totaux de CO₂ estimés par des analyses observationnelles, telles que les inversions atmosphériques, les relevés de CO₂ surface-océan ou la mise à l'échelle des mesures d'échanges écosystémiques de covariance.

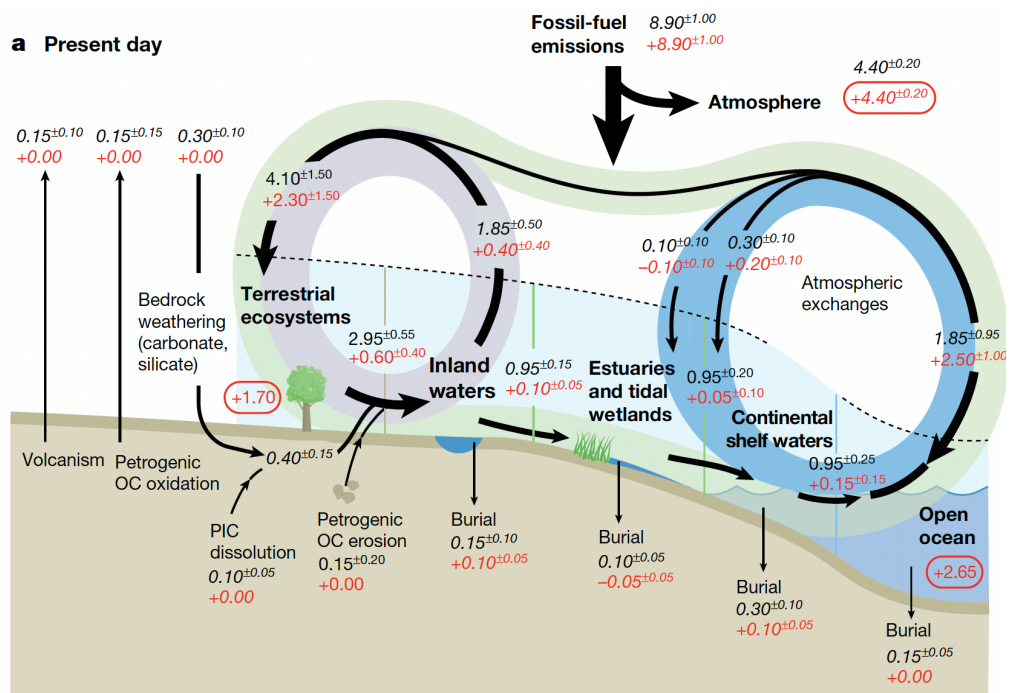


Figure 7. Repositionnement des eaux intérieures dans le bilan carbone global incluant les flux du continuum terre-aquatique (LOAC). Le bilan contemporain carbone mondial (chiffres en noir, période 2005-2014) et sa perturbation anthropique (chiffres en rouge). Le continuum terrestre – aquatique (land-to-ocean aquatic continuum, LOAC) peut être vu comme une succession de système biogéochimiques et physiques connectés, reliant sols continentaux à l'océan. LOAC est segmenté, avec d'une part les terres, devant être compris comme des écosystèmes terrestres, alors que les eaux intérieures comprennent les ruisseaux, les rivières, les plaines inondables, lacs, étangs et réservoirs. Les eaux côtières comprennent quant à elles les estuaires et les eaux du plateau continental. Ils reçoivent du carbone d'origine terrestre provenant des apports des eaux qui s'écoulent en surface et du sous-sol provenant des eaux souterraines douces.

Les implications pour le fonctionnement des lacs et la qualité de l'eau

Le carbone organique (OC) présent dans les lacs et les rivières joue un rôle crucial dans le cycle global du carbone (Cole et al., 2007; Lauerwald et al., 2015; Liu et al., 2022; Raymond et al., 2013; Tranvik et al., 2009). Il sert de vecteur de transport du carbone des environnements terrestres vers les milieux d'eau douce et marins, influence la qualité de l'eau potable et les coûts de traitement associé, et affecte le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Dans ces écosystèmes lacustres, le carbone organique impacte les transferts et la mobilisation de l'énergie, les conditions de luminosité et de pénétration de la lumière (Ask et al., 2009), l'acidité de l'eau (Driscoll et al., 1989), ainsi que le transport des métaux et des polluants (Macdonald et al., 2005). La présence de matière organique naturelle (NOM) pose de nombreux problèmes pour les questions liées à l'eau potable et les solutions de traitement de l'eau, notamment : (i) une détérioration de la qualité de l'eau, provoquant des problèmes de couleur, de goût et d'odeur, (ii) une augmentation des doses de coagulants et de désinfectants nécessaires, ce qui entraîne une production accrue de boues et de sous-produits de désinfection nocifs, (iii) une prolifération biologique dans le réseau de distribution, et (iv) des niveaux accrus de métaux lourds complexés et de polluants organiques adsorbés (Matilainen et al., 2010). **Mieux connaître le cycle du carbone lacustre actuel et ses variations est impératif pour avancer dans la compréhension générale du lac, de son fonctionnement, et pour une compréhension opérationnelle à destination des gestionnaires.**

3. Trajectoires et contrôles temporels affectant les stocks et des flux de carbone dans les lacs à l'anthropocène

Les activités humaines sont responsables de l'accélération des flux de carbone dans les systèmes lacustres, à la fois des transferts depuis les bassins versant, que des émissions, et de la séquestration sédimentaire (Li et al., 2021; Rinta et al., 2017, p.201). Par conséquent il est important de considérer l'ensemble des flux pour confronter les intensités de l'accélération des différents compartiments et mieux évaluer la trajectoire globale des lacs vers des systèmes d'avantage émetteurs ou au contraire d'avantage piègeurs. Les perturbations sont à la fois locales, en lien directe avec les activités humaines, ou globales, en lien avec le réchauffement climatique anthropique. Les sédiments lacustres constituent des archives naturelles des changements environnementaux passés (Dubois et al., 2018; Smol, 2010; Smol et al., 2001). Ces perturbations, enregistrées dans les archives, se sont manifestées tout au long des derniers milliers d'années et accélérées ces derniers siècles et décennies. Les hypothèses générales liées aux facteurs de contrôle sur le long terme des flux de carbone concernent :

- 1) **L'intensification de l'érosion** des sols est liée principalement aux usages anthropiques des sols, provoquant l'augmentation des apports allochtones de carbone (Van Oost et al., 2007), et augmente ainsi la séquestration sédimentaire de carbone de signature plus réfractaire. Bien que ces exports proviennent de stocks de carbone des sols, ils aident à atténuer les effets liés à la perte de carbone due à l'érosion des sols.

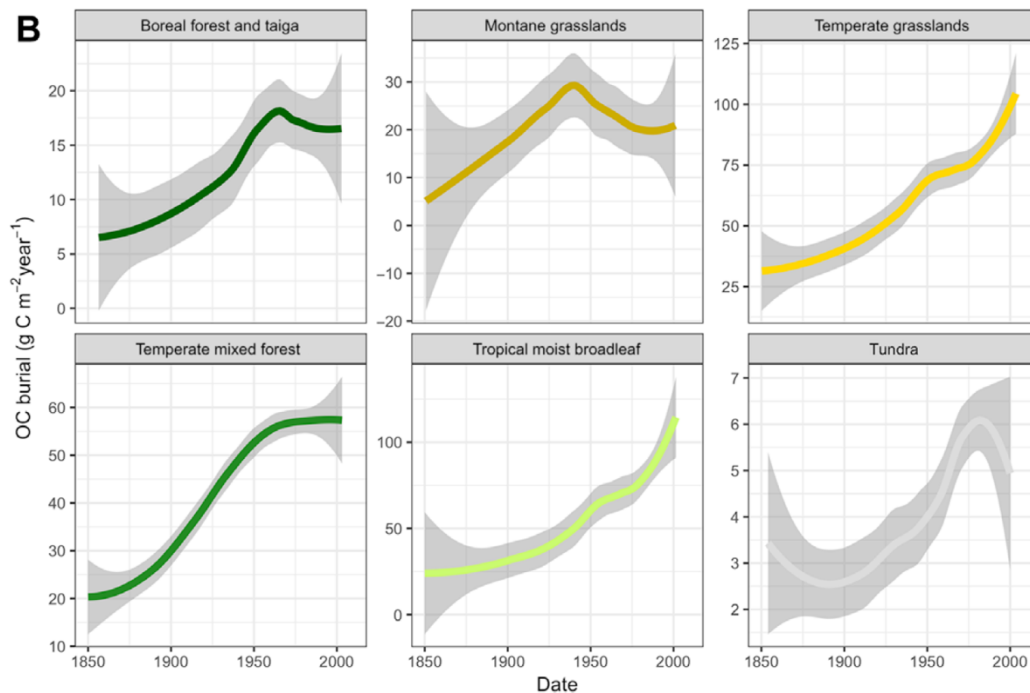


Figure 8. Evolution de la sequestration du carbone lacustre depuis 1850 déterminée à partir de 516 enregistrements sédimentaires lacustres, groupés pour six grandes écorégions. - Anderson et al. Science (2020)

- 2) **Les variations dans les dépôts acides atmosphériques** lorsque les émissions anthropiques de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote se transforment en polluants secondaires. La diminution des retombées acides depuis plusieurs décennies suite à la réduction des émissions de dioxyde de soufre peut diminuer l'acidité des sols et augmenter la solubilité de la matière organique. Ce phénomène est suspecté de causer l'augmentation généralisée des concentrations de carbone organique (OC) dans les eaux de surface dans de nombreuses régions d'Europe et d'Amérique du Nord (Driscoll et al., 1989; Worrall et al., 2004), phénomène appelé « brunissement des eaux », et responsable dans le cas des lacs de moyenne-haute latitudes à l'augmentation de l'accumulation sédimentaire de carbone (Meyer-Jacob et al., 2015).
- 3) **L'eutrophisation culturelle** stimule la production primaire et augmente l'accumulation sédimentaires de carbone autochtones ainsi que la respiration biologique conduisant généralement à des conditions hypoxiques, moins dégradantes, favorables à la préservation en zone pélagique. La sequestration mondiale de C dans les lacs ($\sim 0,12 \text{ Pg an}^{-1}$) a ainsi augmenté de $\sim 72 \text{ Tg an}^{-1}$ depuis 1900 (Figure 8), compensant 20 % des émissions annuelles de CO₂ en eau douce, passant à $\sim 30 \%$ si les réservoirs sont inclus et contribuant au puits de C continental résiduel (Anderson et al., 2020).
- 4) **Le réchauffement climatique**, symptôme de dérèglement global, impliquant une modification profonde du régime thermique (allongement de la stratification et diminution/raréfaction des brassages hivernaux), une augmentation de la production primaire et une diminution de l'oxygène dissous due notamment à l'allongement de la stratification et à la diminution de la solubilité de l'oxygène (Desgué-Itier et al., 2022). De plus, les mécanismes liés au climat qui affectent les exports

des bassins versant incluent l'augmentation des températures, qui accélère la décomposition dans les sols riches en matière organique, et les modifications des régimes de précipitations, qui influencent le lessivage du carbone organique des sols. De plus, la fréquence des sécheresses suivies de réhumidification pourrait stimuler l'activité microbienne, augmentant ainsi les exports de carbone.

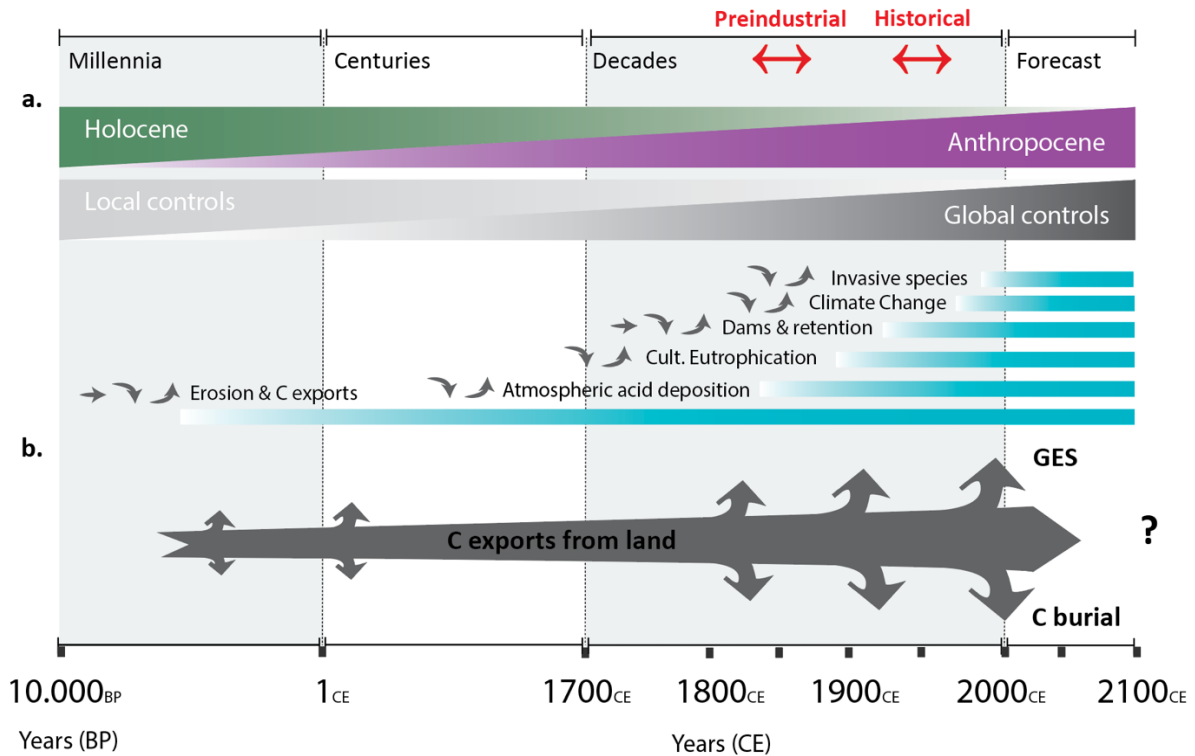


Figure 9. Facteurs de contrôle identifiés du cycle du carbone lacustre. Facteurs de contrôle et période de mise en place (a), effets présumés sur l'intensification des flux de carbone, incluant à la fois l'accumulation sédimentaire et les émissions de GES (b).

- 5) **Certaines espèces invasives**, symptôme de mondialisation, telle les moule quagga, qui filtre l'eau et concentre le carbone organique vers le fond du lac, contribuant ainsi au phénomène de « benthification ».
- 6) Enfin, l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique et des dépôts de nitrates pourraient également expliquer une hausse du carbone organique dans les lacs.

Cependant, l'ampleur et la variabilité temporelle de l'accumulation de carbone restent encore mal définies sur les échelles centennales et millénaires (Figure 9), et l'impact des activités humaines sur le cycle du carbone des lacs à travers la modification du paysage n'a pas été systématiquement évalué. La figure 10 (Figure 10) résume les facteurs principaux de contrôles suspectés des flux de carbone lacustres liées aux activités humaines et certains effets présumés sur 1) la fixation de carbone atmosphérique, 2) la sédimentation et la formation de stocks sédimentaires de carbone, 3) la préservation et l'accumulation sédimentaire de carbone, 4) la transformation et émissions de GES.

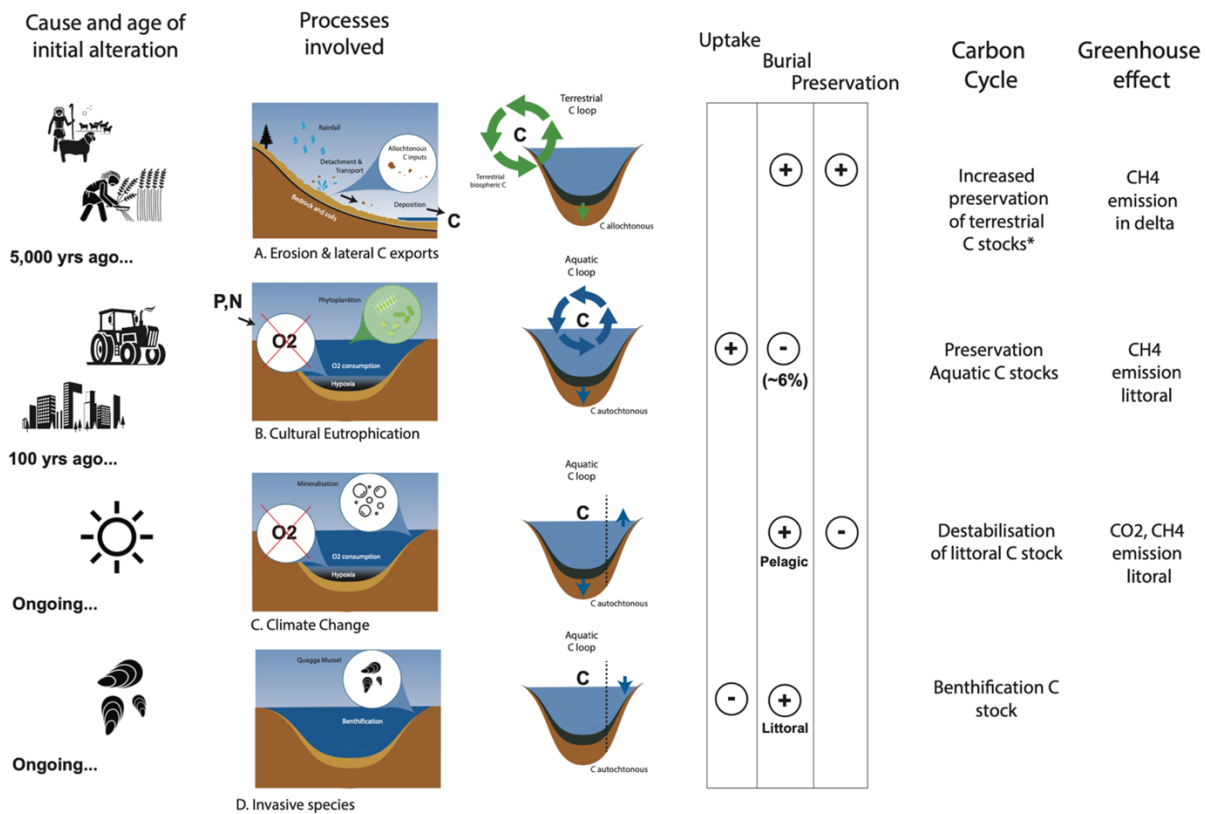


Figure 10. Résumé des principaux facteurs de contrôle historique du cycle du carbone adressé dans ce programme (Volet 2) : 1) l'érosion et les exports de carbone des sols, 2) l'eutrophisation, 3) le changement climatique, 4) certaines espèces invasives. Est omis de cette représentation les effets due à l'acidification des sols qui ont eu des effets significatifs dans les lacs scandinaves notamment.

Les impacts de l'augmentation des flux de carbone sont indiqués en bleu et en vert sur la figure (Figure 10) afin de dissocier la part du :

- 1) « Carbone bleu », faisant référence correspond au CO₂ capté par les **écosystèmes océaniques** du monde entier (Nellemann et al., 2009; Zinke, 2020), ici étendu aux écosystèmes aquatiques et les lacs. Dans le cas d'une accélération des stocks lacustres de carbone bleu on suggère que la capacité de puit du lac est augmentée.
- 2) « Carbone vert et brun », correspond au CO₂ capté par les **forêts** (2e principal puits de carbone naturel sur terre après les océans) et le CO₂ capté par les **sols**, notamment agricoles (Zinke, 2020). L'accélération des stocks lacustres de carbone vert suggère simplement un déplacement de stock de carbone depuis les écosystèmes terrestres vers les systèmes aquatiques, mais ayant potentiellement des effets positifs sur la séquestration à long terme car les zones aquatiques séquestrent plus efficacement le carbone qu'un sol.

Mais ces hypothèses concernant les trajectoires et les contrôles sur les flux sont encore trop peu explorés par cause de données insuffisantes et de limites méthodologiques.

4. Les limites méthodologiques à la compréhension des flux et stocks de carbone lacustre long-terme

Limitation générale liée au manque de modélisation sur les échelles de temps long

Pour mieux représenter les différentes composantes du cycle du carbone lacustre et les processus impliqués, la modélisation mécaniste apparaît comme la méthode la plus adaptée. Elle permettrait de simuler avec précision les interactions complexes entre le stockage du carbone et les émissions de GES, et d'évaluer l'évolution du bilan carbone des lacs à long terme. Dans le cas des lacs, bien que les processus régissant le fonctionnement des lacs et le cycle du carbone aient été largement étudiés, mesurés et intégrés dans des modèles lacustres par une communauté scientifique dynamique au cours des dernières décennies, **il existe toujours un manque d'études utilisant ces modèles lacustres pour analyser l'impact des activités humaines sur le cycle du carbone sur des échelles de temps longs, centennales à millénares** (Figure 11, Soares et al. 2021). Cette lacune limite notre compréhension globale du fonctionnement des lacs, de l'accélération des flux de carbone, des perturbations anthropiques du cycle du carbone et du rôle des lacs dans le système climatique.

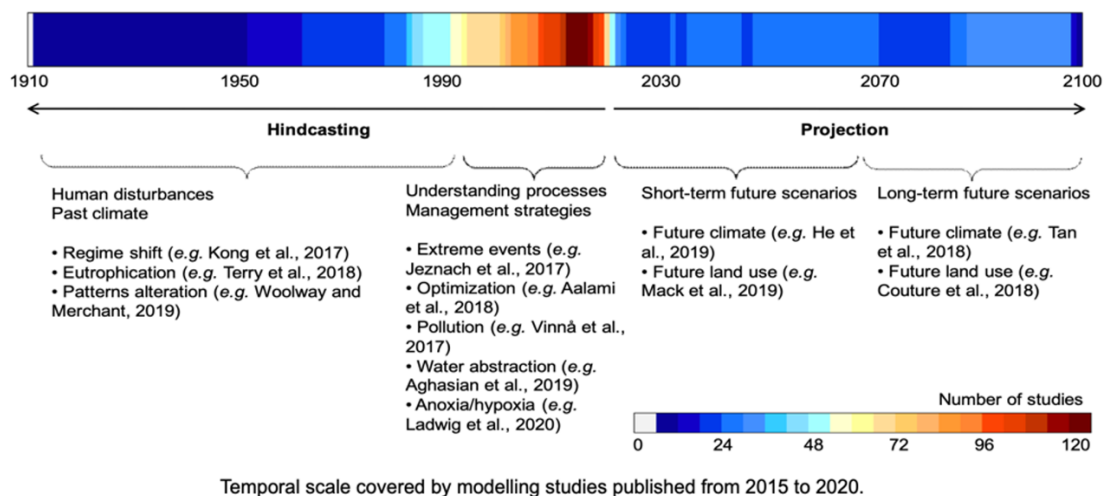


Figure 11. Échelle temporelle couverte par les études de modélisation publiées de 2015 à 2020 (Soares et al. 2021). **La grande majorité des études portent sur des périodes courtes.** Très peu d'études couvrent les périodes longues, notamment pour le passé. Ces limites ont motivé le développement d'approche du long-terme qui n'ont pas encore fait l'objet d'études approfondis.

Quelques bonnes raisons pour étendre les approches déterministes sur de longues périodes :

- Comprendre les processus passés et les mécanismes causaux.
- Estimer les conditions de référence et les perturbations anthropiques.
- Identifier les moteurs principaux et leurs échelles de temps associées.
- Quantifier les processus passés, les flux et les taux de changement.

La question du cycle du carbone lacustre exige une approche intégrée des flux de carbone entre les différents compartiments des systèmes lacs-bassins-versants pour mieux définir le rôle global des lacs en

matière d'émission et de séquestration. Cela permettra de déterminer si le bilan net des lacs s'oriente davantage au cours de l'anthropocène vers un rôle de puits de carbone ou de source d'émissions. Cette approche intégrée et s'appuyant sur la modélisation et sur la collecte ciblée de données manquantes pour caler les modèles permettra d'adresser un grand nombre de limitations particulières dans la compréhension actuelle du cycle du carbone lacustres :

1. Limites particulières sur les estimations de la séquestration sédimentaire de C lacustre

- Les **bilans de masse sont incomplets**, les données sont encore trop sporadiques. Notamment, en France, il n'existe pas de synthèse de données consolidées sur le stockage sédimentaire de carbone lacustre, ni sur les émissions de GES.
- Les **zones littorales sont encore trop mal intégrées** dans les calculs de stocks à l'échelle des lacs. Ces zones sont très hétérogènes et très peu étudiées par la communauté de paléolimnologie en comparaison de la zone pélagique. Cette limitation dans la connaissance et dans la collecte de données, conduit potentiellement à une sous-estimation des stocks de C globalement.
- Les estimations actuelles globales reposent sur des extrapolations à partir de mesures locales conduites distinctement, de GES, d'accumulation sédimentaire, ou de transfère. Les **bilans nets sont réalisés rarement localement**, où estimés globalement à partir des extrapolations distinctes. Une compréhension plus fine à l'échelle de sites pilotes permettrait de compléter les estimations globales de trajectoires historiques des flux et stocks de carbone.
- Les **estimations globales ne tiennent pas bien compte des émissions provenant des petits lacs**, étangs agricoles, retenues collinaires, qui sont également susceptibles de contribuer. De plus, il est évident d'après ces études que les retenues artificielles émettent une grande partie des gaz à effet de serre. Avec le nombre de retenues continuant d'augmenter dans le monde entier, quantifier l'impact du carbone deviendra de plus en plus important, tout comme la compréhension de la manière d'atténuer les émissions de carbone lors du développement des réservoirs.

2. Limites concernant les trajectoires historiques des flux et stock de carbone lacustre

- Les trajectoires des émissions mal contraintes même si les études tendent à indiquer une augmentation de l'ensemble des flux distincts (i.e. transfert, accumulation sédimentaire, émissions GES). Les données issues des archives sédimentaires permettraient alors de fournir une partie des données nécessaires pour décrire les trajectoires des stocks.
- Le devenir des stocks déjà constitués reste très incertain dans un contexte de réchauffement climatique, notamment en zone littorale. Il est envisageable qu'il y ait à terme un découplage des réponses de la préservation du carbone entre zone littorale & pélagique. Or, la sensibilité des stocks littoraux soumis au CC reste mal contrainte et peu modélisée.

3. Limites dans l'évaluation des processus et des facteurs de control à long terme

- Intégration insuffisante des processus lacustres (e.g. évolution du régime des brassages, taux de respiration de l'oxygène, taux de minéralisation du carbone organique, diffusion de GES...) et limitation dans la quantification passée des variables environnementales par les approches paleolimnologiques. Il y a une quasi-absence des approches de modélisation mécaniste en paléolimnologie
- Les modèles lacustres actuels ne sont pas utilisés pour les échelles de temps longues
- Le poids des forçages sur le fonctionnement des lacs reste ainsi mal apprécié, avec trop d'importance accordé aux forçages de temps court mesurés par les approches instrumentales, de l'ordre de la variabilité annuelle à pluri-décennale.

5. Question : Quelles modalités de la perturbation anthropique du cycle du carbone lacustre à l'anthropocène ?

La question des modalités de la perturbation anthropique du cycle du carbone lacustre à l'Anthropocène est cruciale (Regnier et al., 2022), mais elle est entravée par les limites précédemment évoquées. Ces limites, notamment l'intégration insuffisante des processus lacustres, le manque de données de référence et les défis liés au couplage des échelles de temps, restreignent notre capacité à fournir des bilans précis du carbone et à comprendre avec nuance les impacts humains sur le cycle du carbone lacustre, tant à long terme que dans le contexte actuel. Le programme de recherche que je mène vise à identifier les signaux précurseurs et la variabilité historique des perturbations qui modifient les flux et les stocks de carbone dans les lacs. Mes travaux tendent à identifier des perturbations **1)** récentes et marquantes, comme l'eutrophisation et diminution des conditions d'oxygénation des lacs au cours du XXème siècle, **2)** en cours ou à venir comme le changement climatique ou les espèces invasives, et **3)** reculée qui remonte à la période de sédentarisation de l'humanité et de développement de l'agriculture. Ces différentes étapes révèlent l'histoire complexe des interactions entre l'humanité et son environnement, et illustrent les défis successifs auxquels les systèmes lacustres sont confrontés. En adoptant une retrospective à l'échelle plurimillénaire, il devient possible de remettre en question la vision répandue selon laquelle les perturbations anthropiques du cycle du carbone ne seraient survenues que durant le siècle dernier. Cela permet non seulement de mieux redéfinir les conditions de base non altérées, mais aussi de quantifier plus efficacement l'impact humain sur le cycle du carbone. De plus, les exercices prospectifs offrent la possibilité d'anticiper les futurs défis et d'envisager les conséquences potentielles qu'ils pourraient engendrer.

6. Conclusion : positionnement et organisation des activités de recherche autour de l'analyse des stocks et des flux de carbone lacustres à l'Anthropocène

Depuis cinq ans je conduits un programme de recherche qui se focalise sur le développement méthodologique lié à l'intégration de la modélisation (mécaniste) et des archives sédimentaires, et à la mise en place d'une équipe opérationnelle localement. Cet effort de développement vise à la mise en place d'une expertise innovante et interdisciplinaire (modélisation et paléolimnologie). Il s'agit en outre de s'appuyer sur cette nouvelle expertise afin de répondre à la fois à des **questions fondamentales autour du fonctionnement général des lacs et du carbone**, mais également à des questions opérationnelles liées à l'évolution pluri-décennales de la qualité de l'eau, en appui aux politiques publiques.

Je crois pouvoir affirmer qu'il s'agit d'un **travail de rupture** qui ne trouve pas, à ma connaissance, d'équivalent ailleurs, par cause de cloisonnement historique entre les disciplines de la paléolimnologie et de la modélisation. Le pas est grand à franchir, mais les promesses de retour sont importantes car il s'agit d'introduire avec la modélisation une représentation des « processus » dans les approches de long-terme qui en sont encore presque totalement absente.

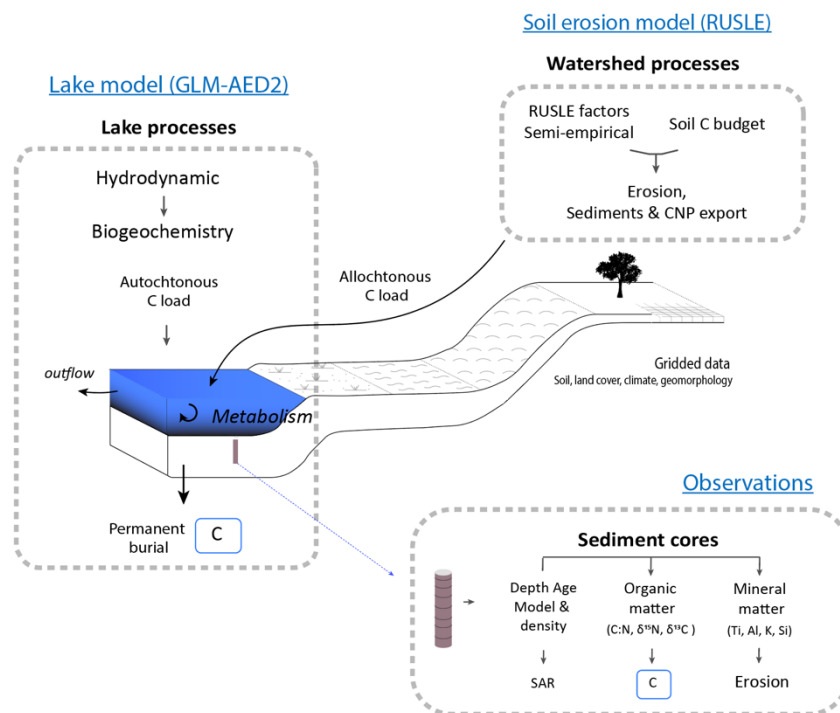


Figure 12. Principaux flux de sédiments et de carbone (C) allochtones et autochtones vers les archives sédimentaires lacustres. L'intensité de ces flux varie dans le temps et dépend des changements climatiques et de l'occupation des sols. Les données d'observation enregistrées dans les chronoséquences sédimentaires des lacs peuvent être utilisées pour contraindre et/ou valider les modèles de l'érosion et lacustre.

Je choisis de recourir à la modélisation en complémentarité forte des archives pour aider à quantifier les changements, pour standardiser les données de reconstitution, pour obtenir dans le cas de mes projets opérationnels des métriques de qualité d'eau compatibles avec les normes de la directive cadre sur l'eau. A

ce jour, le développement méthodologique et **les preuves de concepts ont été réalisés avec succès** à la fois 1) pour le compartiment lacustre et 2) pour le compartiment bassin versant autour de la question de l'érosion des sols. Un article a été publié (Itier-Desgué et al 2023), deux sont soumis (Soares et al, Mazure et al.), trois autres sont en préparation (Itier-Desgué et al, Soares et al, Mazure et al.). Des marqueurs paléo-environnementaux ont été identifiés (sources du carbone), utilisés (accumulation de carbone) ou développés (proxy d'oxygène des lacs) afin de pouvoir densifier les données pour caractériser les flux de carbone et les facteurs de contrôle.

Mon projet au CARTEL permet d'aller plus loin dans la connaissance du fonctionnement lacustre en portant un nouveau regard sur le temps long (transition d'états, héritages dus aux forçages anthropiques et climatique, résistance, résilience), mais aussi en abordant le système bassin versant-lac et le cycle du carbone sous un nouvel angle, plus intégrateur, intégrant données paléolimnologiques, modèles lacustres et modèles de bassins versant, qui complétera les approches déjà développées par l'unité sur les réseaux trophiques (Figure 12). Je souhaite ainsi participer 1) aux collectes de données et au développement de méthodes localement en m'appuyant sur les observatoires et 2) généraliser des résultats ou concepts à l'échelle régionale et globale Figure 13.

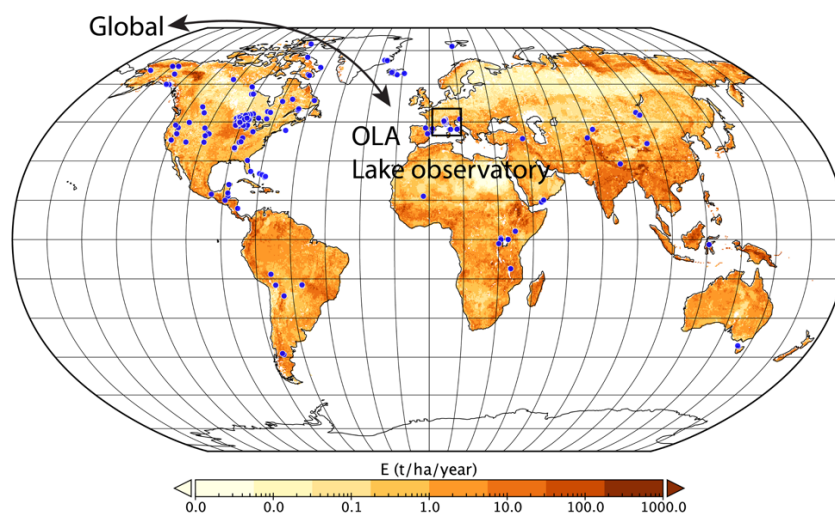


Figure 13. Périmètre du programme : du développement méthodologique **local** à l'échelle des observatoires aux prospections **globales** par la synthèse de données et la modélisation.

Mes perspectives de recherches pour les prochaines années se concentrent sur le fonctionnement du lac et le carbone, en y ajoutant de nouvelles composant que je ne prenais pas actuellement en compte, **notamment en intégrant désormais les émissions de GES**. Cette partie, détaillée dans les perspectives (Section 3.1), repose sur mon implication dans le PEPR FairCarboN dont je suis porteur de l'un des projets orientés vers le couplage de données paléoenvironnementales et modèles. Cette implication est une opportunité forte pour la **continuité et la cohérence des efforts d'intégration modèles et archives**, tout en les structurant autour de nouvelles questions sur le cycle du carbone des plans d'eau pour les cinq prochaines années. Ce projet constitue **une perspective de partenariat fort et structurant au niveau national pour les activités de recherches multi-échelles entreprises sur les lacs**.

Section 2.2 – Développement d’une méthode d’assimilation des données paléolimnologiques et des modèles mécanistes pour l’étude du fonctionnement lacustre et du cycle du carbone

Une méthode d'assimilation de données pour la rétro-observation a été développée pour estimer l'état passé le plus probable de variables en combinant données paléolimnologiques et simulations. Ce volet concerne le compartiment lacustre exclusivement. Le terme d' « assimilation » fait référence dans ce manuscrit à une démarche pour combiner de manière optimale les observations et le modèle lacustre pour estimer au mieux l'état et l'évolution du système lac. Il correspond à une approche méthodologique adaptée dans ce programme au domaine de la paléolimnologie, et non pas à l'outil mathématique du même nom.

Sommaire de cette section :

- Un premier volet passe en revue les **marqueurs paléolimnologiques** nécessaires à la validation d'un modèle lacustre adapté aux échelles de temps long :
 - **Revue des marqueurs existants** de stocks, flux et sources de carbone
 - **Développement d'un marqueur** des conditions d'oxygénation de l'hypolimnion
- Un second volet présente le développement de l'**approche d'assimilation** modèle-données proposée dans ce programme (développé au cours des 5 dernières années) :
 - **Présentation des modèles 1d** existants hydrodynamiques (GLM) et écodynamiques (AED2)
 - **Présentation de la méthode d'assimilation** développée
- Synthèse récapitulative de l'approche d'assimilation développée

7. Marqueurs paléolimnologiques des flux, stocks et sources de carbone, et niveaux de confiance

Mes activités 1) recourent aux méthodes existantes et 2) participent au développement de méthode de réflectance sur banc d'analyse densifier les données de flux et stocks de carbone sédimentaire. Pour questionner les taux d'accumulation de carbone j'ai recours en complément aux outils de datation des sédiments qui me permettent d'estimer les vitesses de sédimentation (Jenny et al., 2013, 2016a). Enfin, je recours aux marqueurs géochimiques pour identifier et quantifier les sources de carbone constitutives des sédiments, notamment pour discriminer les origines terrestres et aquatiques.

Calcul des stocks et des taux d'accumulation de carbone sédimentaire

Les approches paléolimnologiques recourent très largement aux « proxys », caractéristiques physiques ou biochimiques préservées du passé, qui permettent de pallier l'absence de mesures environnementales directes. Contrairement aux « proxys » paléo-environnementaux, les stocks et les accumulations de carbone mesurés ont le grand avantage de correspondre à des estimations directes de la séquestration de carbone lacustre. Ainsi, le niveau de confiance dans les reconstitutions sera relativement

élevé au point de prélèvement des sédiments, et dépendra essentiellement de la qualité du modèle d'âge utilisé dans le cas des estimations des taux d'accumulation sédimentaire de carbone (Figure 14).

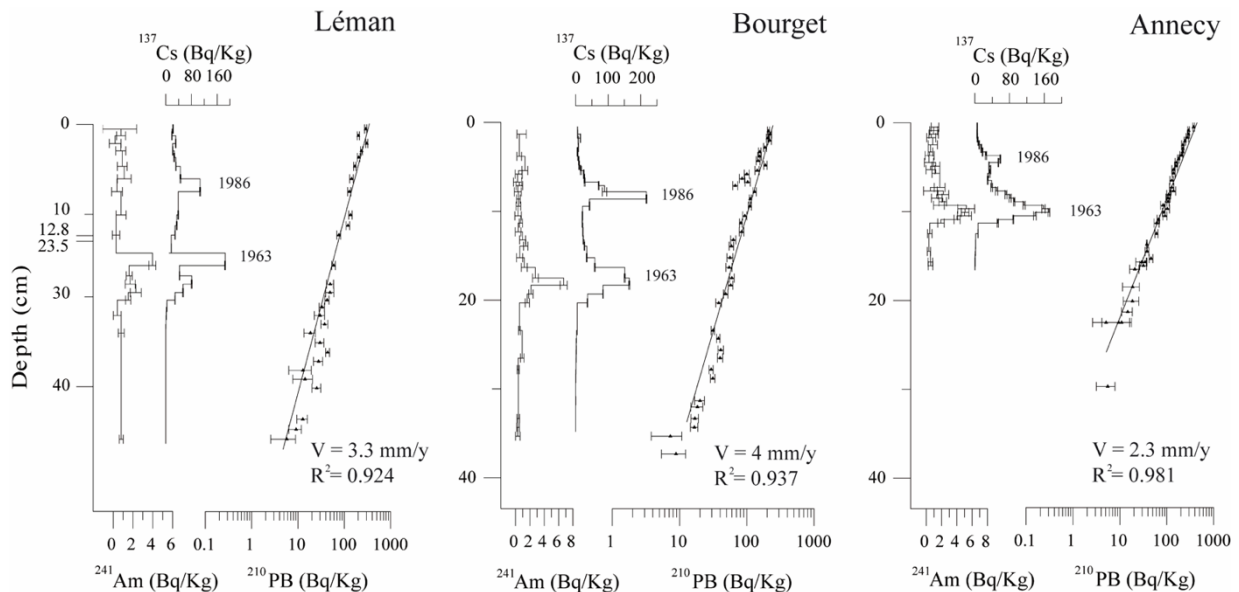


Figure 14. Datation de sédiments superficiels lacustres - Profils du plomb (^{210}Pb) du césium (^{137}Cs) et de l'Américium (^{241}Am) suivant la profondeur des sédiments superficiels (± 40 cm) des trois lacs (Jenny et al. 2013).

La mesure de taux d'accumulation sédimentaire est un prérequis à l'analyse de la séquestration de carbone par les lacs. Le calcul des taux d'accumulation de carbone sédimentaire implique l'analyse des variations de la concentration de carbone organique à travers différentes couches de sédiments, souvent réalisée en combinant des méthodes de datation telles que le ^{14}C ou le ^{210}Pb . En comparant les concentrations de carbone à des profondeurs d'âge connus, il est possible d'estimer la vitesse à laquelle le carbone s'est accumulé au fil du temps.

Analyses radiochimiques - La méthode de datation par l'isotope 210 du plomb (^{210}Pb) est utilisée pour dater les sédiments récents, couvrant une période de 100 à 150 ans (e.g. Krishnaswamy et al., 1971 ; Appleby & Oldfield, 1978). Cette méthode est basée sur la loi de désintégration radioactive :

$$N_{(x)} = N_0 e^{-\lambda t} \text{ où :}$$

- N_0 correspond au ^{210}Pb initial déposé à l'interface eau-sédiment
- $N_{(x)}$ correspond au ^{210}Pb mesuré dans le sédiment.
- λ est la constante de désintégration du ^{210}Pb (0.0311 an⁻¹)

Le plomb-210 (^{210}Pb) des sédiments provient de deux sources : le radon-222 (^{222}Rn) émis par les continents, qui se désintègre rapidement dans l'atmosphère et se dépose dans les sédiments via les précipitations, le ruissellement ou par dépôt sec. Ce ^{210}Pb « non-supporté » diminue dans le sédiment selon la loi de désintégration radioactive avec une période de 22,3 ans, permettant de dater les sédiments. Le ^{210}Pb « supporté » provient de la désintégration constante des isotopes de la famille de l'uranium-238 (^{238}U). La valeur mesurée du ^{210}Pb total dans le sédiment est la somme des deux sources, et doit être corrigée en soustrayant le ^{210}Pb supporté, estimé par l'activité du radium-226 (^{226}Ra). Cette méthode de

datation suppose l'absence de mélange des sédiments et de diffusion du plomb. Un modèle convertit ensuite la décroissance de l'activité du plomb-210 en âge des sédiments.

Les retombées atmosphériques de césium 137 (^{137}Cs) et d'américium 241 (^{241}Am) d'origine anthropique peuvent servir de marqueurs chronostratigraphiques. Ces radionucléides proviennent de la désintégration de l'uranium 235 (^{235}U) et du plutonium 239 (^{239}Pu). En Europe, deux pics de ^{137}Cs sont observables dans les sédiments : l'un correspond aux essais nucléaires atmosphériques de 1963, l'autre à l'accident de Tchernobyl en 1986. Les essais nucléaires aériens ont commencé en 1954. Le ^{241}Am , produit par désintégration du ^{241}Pu avec une période de 13,2 ans, ne se trouvait pas dans les dépôts en 1986 car il était principalement associé à des particules lourdes déposées près du site de Tchernobyl.

La datation au radiocarbone - La datation au radiocarbone (^{14}C) a été utilisée dans mes travaux sur l'érosion globale (Jenny et al. 2019). Cette méthode est communément utilisée pour les longues échelles de temps de l'Holocène. La datation au radiocarbone (^{14}C) des sédiments lacustres peut documenter les taux d'accumulation des sédiments au cours des 50 000 dernières années. Avec une demi-vie radioactive de 5 730 ans, la désintégration radioactive du ^{14}C est minimale pour les échantillons de moins de 300 ans et doit être complétée par d'autres techniques de datation.

Marqueurs de sources de carbone

Plusieurs approches, présentés brièvement dans cette section pour la compréhension générale du manuscrit, sont utilisées pour estimer les concentrations totales ainsi que les contributions de la matière organique provenant de diverses sources (Tableau 2). Jusque maintenant mes études recourent régulièrement aux analyses élémentaires, isotopiques et à la Pyrolyse Rock Eval.

Tableau 1. Les différentes méthodes de détermination des sources de carbone sédimentaires.

Objectif	Méthode Utilisée
1. Identifier les sources de matière organique dans les sédiments (spécifiques et génériques)	Utilisation de biomarqueurs lipidiques (acides gras, stérols, hydrocarbures)
2. Identifier les classes d'algues (spécifique des algues)	Utilisation de biomarqueurs pigmentaires et lipidiques
3. Estimer l'importance relative de ces sources en termes de matière organique préservée et en tant que substrats pour la respiration intra-sédimentaire	1) Analyse isotopique stable des fractions totales et lipidiques de la matière organique 2) Microscopie optique 3) Pyrolyse RockEval

Pyrolyse Rock-Eval

Les analyses de Pyrolyse Rock Eval ont permis dans mes recherches de caractériser les variations et sources de carbone notamment des lacs péralpins de l'observatoire OLA (e.g. Jenny et al., 2013; Perga et al., 2015). L'analyse thermique de la pyrolyse Rock-Eval (Espitalié et al., 1985) (initialement appliquée pour estimer le potentiel pétrolier d'une roche sédimentaire, permet aussi de suivre des changements de source, de dégradation et de préservation de la matière organique dans les archives sédimentaires lacustres (Mills et al., 2018). Dans les sédiments lacustres, les principaux paramètres Rock-Eval utilisés sont : le carbone

organique total (TOC), les hydrocarbures libres (S1) et les hydrocarbures liés (polymériques) (S2), qui décrivent la quantité et la proportion d'hydrocarbures volatils (S1) et les biopolymères de paroi cellulaire et leurs produits d'altération (S2). Les valeurs associées de l'indice d'hydrogène (HI) mesurent l'étendue de l'hydrogénation de la matière organique, avec des valeurs élevées d'HI correspondant à la matière organique (OM) algale et des valeurs basses d'HI associées à la matière organique terrestre. De même, l'indice d'oxygène (OI) fournit une estimation de la quantité de composés contenant de l'oxygène, un paramètre qui augmente avec le transport des sédiments, le remaniement et la décomposition biologique aérobie directe.

Les isotopes et pourcentage de carbone et d'azote organiques

Les rapports isotopiques $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ sont utilisés pour estimer la contribution relative des sources terrestres et aquatique de la matière organique sédimentaire (e.g. Fry and Sherr, 1989). Bien que cette approche soit relativement simple et offre une estimation intégrée des sources pour l'ensemble du carbone de l'échantillon, elle ne fournira des informations utiles que lorsqu'il existe plusieurs sources spécifiques terrestres ou aquatiques. La mesure du ^{14}C permet également d'estimer les sources de carbone lorsque les âges des contributeurs sont connus (e.g. production lacustre de l'année, roche vieille du bassin versant).

Les rapports élémentaires carbone/azote (C/N) sont depuis longtemps utilisés pour caractériser la matière organique sédimentaire en général (Meyers, 1994, 1997; Tyson, 1995), et en particulier, pour distinguer la matière organique (MO) d'origine phytoplanctonique de celle produite par les plantes supérieures, et ainsi comme indicateur des proportions relatives des sources autochtones et allochtones (Talbot and Lærdal, 2000). Bien que la valeur exacte du rapport C/N peut être variable d'un site à l'autre, il est généralement admis que le phytoplancton a un C/N inférieur à 10-12. Les valeurs entre 10 et 20 indiquent des mélanges des deux types de matière organique, et un C/N supérieur à 20 est considéré comme source de matière organique d'origine principalement végétale supérieure ou terrestre. La combinaison des signatures et d'un **modèle de mélange** associé permet une estimation des sources, comme détaillé par *Mittelbach et al. (2024)*.

Biomarqueurs lipidiques et pigmentaires :

L'utilisation de biomarqueurs lipidiques (e.g., acides gras, stérols, hydrocarbures) et pigmentaires permet d'identifier de manière spécifique les sources de diverses sous-fractions de matière organique. Cependant, attribuer de manière non équivoque des sources aux biomarqueurs est difficile, car ils sont rarement produits par une seule classe d'organisme. Les biomarqueurs pigmentaires permettent d'investiguer plus particulièrement les classes d'algues.

- Les concentrations en acides gras (CFA, mg/g d'échantillon sec) se calculent généralement en comparant la surface du pic de l'acide gras avec la surface du pic de l'étalon
- De manière qualitative (pourcentage), les compositions des acides gras individuels se calculent en comparant la surface du pic de chaque acide gras avec la surface totale des pics de tous les acides gras présents dans l'échantillon.

Le carbone de différentes matières organiques s'estime enfin en utilisant les relations de conversion des acides gras spécifiques aux lipides extractibles, puis au carbone organique total, comme décrites par (Canuel and Martens, 1993).

Tableau 2. Les différents biomarqueurs lipidiques liés aux acides gras (Adapté de Xu et al 2015)

Catégorie	Acides Gras (lipides)	Biomarqueur
LCFAs	S(>24:0)	Plantes terrestres
SAFAs	S(non saturés)	-
MUFAs	S(monoinsaturés)	-
PUFAs	S(polyinsaturés)	-
BAFAs	S15 + S17 + 18:1v7	Bactéries
Biomarqueur Cyanobactéries	18:3v6 + 18:4v3	Cyanobactéries
Biomarqueur Plantes Aquatiques	18:2v6 + 18:3v3	Plantes aquatiques

Rapports isotopiques stables sur composés spécifiques

La mise en place de l'analyse isotopique sur composés spécifiques fourni désormais un nouvel outil puissant pour différencier les différentes sources d'un même biomarqueur, à condition que les signatures isotopiques des sources soient différentes.

Microscopie

Des observations visuelles des algues séparées des sédiments peuvent être réalisées par microscopie optique. Des échantillons sélectionnés sont alors photographiés à l'aide d'une caméra montée sur microscope. Les images sont ensuite capturées à l'aide du logiciel puis analysé par l'opérateur (Simonneau et al., 2013).

Correction pour estimer le bilan d'accumulation à l'échelle du lac

Des variations existent au sein des bassins sédimentaires dont il faut tenir compte pour estimer les accumulations de carbone à l'échelle du lac. Ces variations peuvent être attribuées aux différences spatiales dans 1) les sources de carbone, incluant la production primaire aquatique et l'apport allochtone de détritiques terrestres, 2) de la remobilisation et du transport interne, liée aux gradients hydrodynamiques entre zone calme profonde et zone d'énergie littorale, 3) le gradient de préservation du carbone organique, lié aux conditions d'oxygène de l'eau. Si les causes de la variabilité spatiale diffèrent selon les études, toutes semblent s'accorder que l'approche d'un seul carottage central entraîne une surestimation du le stock de carbone organique total du lac, de l'ordre de 30 % à 200%, ou plus rarement à une sous-estimation de l'ordre de 50 %. Le niveau de correction pourra être adapté selon les besoins de l'étude et selon la complexité du bassin sédimentaire :

- 1) Dans le cas d'un bassin sédimentaire relativement uniforme, la variabilité spatiale de l'accumulation de carbone organique dépend principalement de la bathymétrie. Dans ce cas, le « focussing » fait référence au phénomène par lequel le carbone organique sédimenté est d'avantage concentré dans la zone pélagique moins oxygénée et moins soumis à des conditions hydrodynamiques forte (e.g. vagues qui remobilise les particules) par rapport aux zones moins

profondes. Il est possible de corriger indépendamment chaque estimation depuis un simple carottage central en se concentrant sur le ratio du flux de ^{210}Pb non supporté au site d'étude par rapport au flux régional moyen estimé de ^{210}Pb atmosphérique. Cette méthode reflète de manière plus précise le taux d'accumulation sédimentaire dans l'ensemble du bassin et prend en compte les motifs de dépôt inégaux au sein d'un bassin lacustre. Cette méthode est appropriée notamment aux petits lacs assez homogènes.

- 2) Dans le cas d'un bassin sédimentaire très variable – Notamment dans les grands lacs où la variabilité spatiale est contrôlée par la production primaire interne et les apports par les rivières vers les deltas. Dans ce cas, les estimations depuis un simple carottage en zone profonde doivent être complété par de nouveaux carottages multiples dans les différents environnements sédimentaires du lac.

Développement pour mesurer des concentrations de carbone sur banc hyperspectral

Mon objectif lors de l'acquisition d'un banc d'analyse automatisé (Figure 15) en 2021 avec EDYTEM est de renforcer les infrastructures permettant d'ambitionner des campagnes de collectes et d'analyses de sédiments large échelle, notamment sur l'ensemble du territoire Français. Dans le cadre du projet d'amorçage MITI C-Sensible et de l'ANR C-ARCHIVES j'ai ainsi initié l'achat d'un banc d'analyse multi-capteurs non-destructif MSCL-S Geotek afin de compléter et densifier les mesures classiques type CHN. Le laboratoire EDYTEM (<https://edytem.osug.fr>) et l'entreprise Envisol (<https://www.envisol.fr>) ont apporté sur cet équipement un banc hyperspectral ASD.

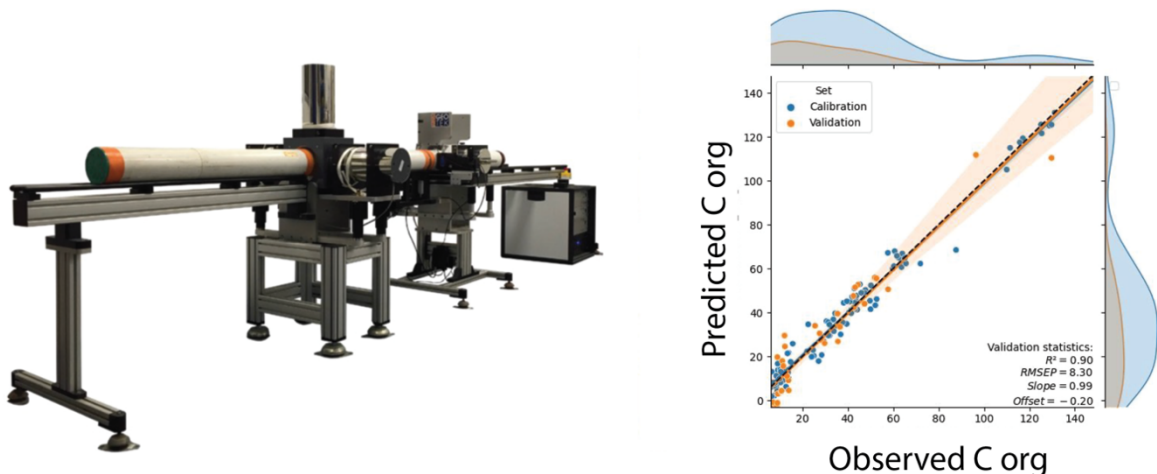


Figure 15. Acquisition d'un banc d'analyse MSCL-S (© Geotek) en partenariat avec CNRS EDYTEM pour l'analyse non destructive des stocks de carbone, des pigments et de la texture des archives sédimentaires lacustres. Équipement obtenu du côté INRAE dans le cadre du projet MITI C-Sensible et de l'ANR C-ARCHIVES (JP Jenny). Le banc MSCL-S sur Technolac est actuellement équipé d'un 1) Geoscan V imagerie (RVB) par balayage linéaire, 2) spectroscopie ASDI LabSpec visible et proche infrarouge, 2) vitesse des ondes P par transducteurs piézoélectriques, 4) Spectromètre Minolta visible et proche UV.

Dans ce cadre je participe au développement de la calibration du signal du carbone obtenu par l'ASD avec Pierre Sabatier (EDYTEM) et Kenin Jacq (SpecSOLE). La calibration de signaux géophysiques et géochimiques obtenu par l'ASD ont déjà été réalisés avec succès (e.g. Jacq et al., 2019, 2022). Dans un premier temps le but est de créer à partir des spectres de réflectance de l'ASD des modélisations du carbone spécifiques des sédiments Français, en recourant à 12 sites des Alpes, sélectionnés dans différents contextes géologiques. Des carottes sédimentaires y ont été prélevés puis analysés par CHN, perte au feu (LOI) et spectroscopie visible proche infrarouge (ASD). Des approches chimiométriques sont utilisées pour l'apprentissage automatique, afin de reproduire les variables CHN à partir des données spectrales ASD. L'apprentissage, par site et sur l'ensemble des sites, permet d'identifier les longueurs d'onde importante puis de prédire les teneurs des variables souhaitées. Si certains sites sont encore complexes à modéliser pour les autres sites, les R^2 sont de l'ordre de 0,9 soit très bon, ce qui montre la capacité de l'ASD à modéliser notamment le Corg. Le graphique prédit vs observé (Jacq et al en préparation) est présenté Figure 15.

8. Marqueurs des conditions d'oxygénation lacustre et de préservation du carbone

Mes travaux ont permis de développer un proxy de conditions d'oxygénation que j'ai utilisé en parallèle d'autres méthodes plus classiques (Jenny et al. 2013). Une variété d'indicateurs peut capturer les variations des dynamiques d'hypoxie passées, tels que les restes de chironomides subfossiles (Millet et al., 2010 ; Frossard et al., 2013), la préservation de la matière organique, les indices de bioturbation (Ariztegui et al., 2001, p.20), les pigments bactériens (Dreßler et al., 2006), le degré de pyritisation (Roychoudhury et al., 2003) ou l'accumulation de métaux traces (Tribovillard et al., 2006). Mes travaux de thèse ont recouru à la présence de sédiments varvés qui est un indicateur de l'hypoxie à l'interface eau/sédiment dans les lacs (Jenny et al., 2014; Zolitschka, 2003, Figure 16). A partir de cet indicateur, j'ai entrepris de développer et valider une approche de reconstitution quantitative se basant sur l'analyse de la distribution et de la datation des varves à l'échelle d'un lac à partir de carottages multiple (Figure 16). Brièvement, les varves correspondent à un motif de dépôt sédimentaire saisonnier qui disparaît lorsque l'interface eau-sédiment est oxygéné et permet la colonisation par le macrobenthos fouisseur qui remue les premiers millimètres de sédiment (Figure 16).

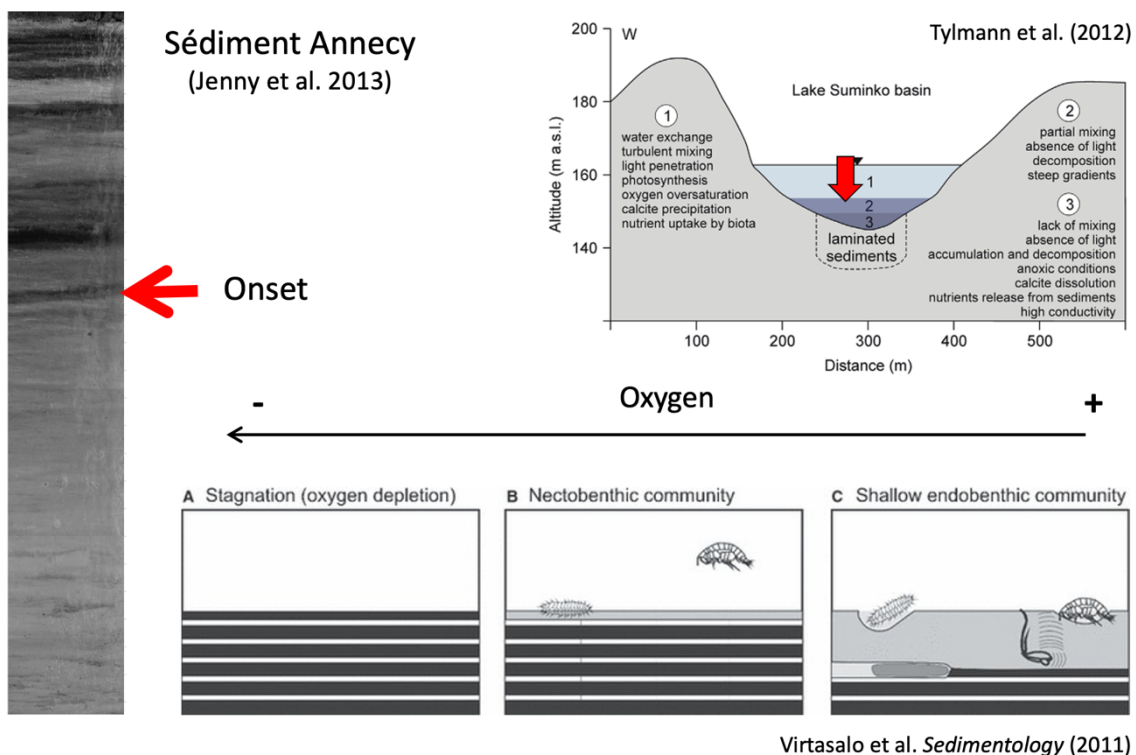


Figure 16. Zones d'oscillation des varves : archivage des conditions à l'interface eau/sédiments. La préservation du faciès varvé dans les sédiments traduit un état désoxygéné de l'eau à l'interface des sédiments (Zolitschka and Enters 2009). En effet, l'absence d'oxygène dissous éloigne ou détruit les organismes fouisseurs, qui, en conditions normales, favoriseraient le brassage des sédiments. Une étude a permis de reconstituer les variations d'oxygénation sur 11 000 ans dans le lac Lugano (Italie) grâce à un indice de préservation des varves (Ariztegui 2001).

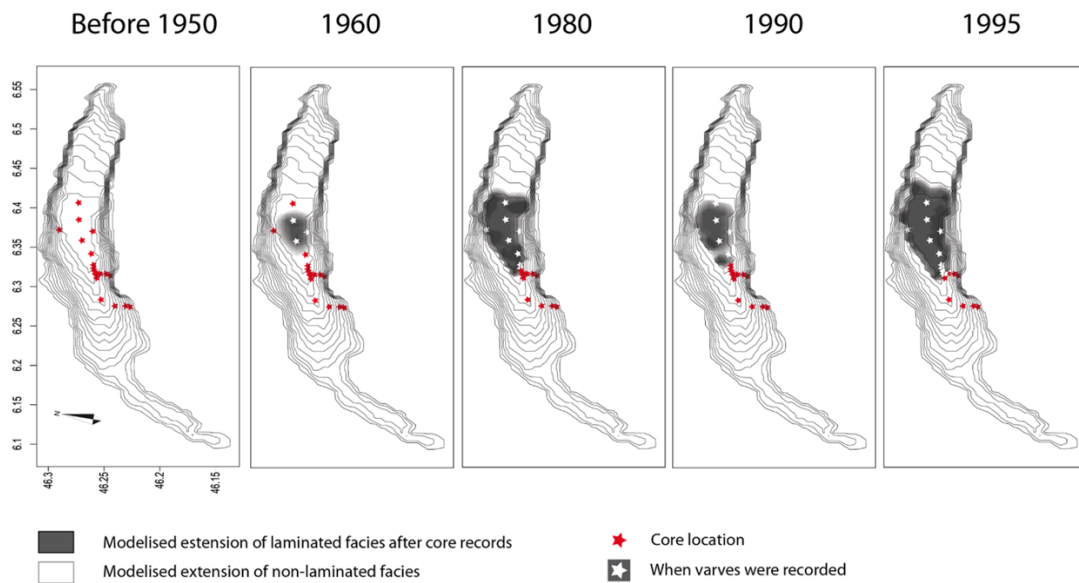


Figure 17. *Étendue de la zone hypoxique dans le lac Léman basée sur l'enregistrement sédimentaire des varves. La zone hypoxique est localisée dans la zone pélagique. Les étoiles indiquent la position des carottes sédimentaires, les étoiles blanches indiquent la présence de varves à la date considérée (Jenny et al. 2014).*

Les varves sont des sédiments laminés à rythmicité saisonnière (De Geer en 1912 (c.f. De Geer 2002, réédition de l'acte de colloque de 1912). Dans le cas des lacs périalpins de l'observatoire (i.e. Léman, Bourget, Annecy, Aigueblette), tempérés et carbonatés, les varves sont de type biochimiques, comme il a été observé généralement dans le cas des lacs périalpins (Kelts and Hsü 1978; Lotter 2001 ; Francus 2004; Giguet-Covex 2010). La méthode développée (Jenny et al., 2013) pour reconstituer le régime de l'hypoxie a été appliquée ici aux lacs de l'observatoire OLA. Au total, plus de 80 carottes sédimentaires ont été requises afin de couvrir les zones d'oscillation de l'hypoxie et de conduire les reconstitutions (Figure 18).

L'analyse spatiale des sédiments a permis de cartographier l'extension des varves avec une résolution annuelle. Ainsi, il a été possible de calculer la hauteur de la tranche d'eau dont les conditions conduisent à la préservation des varves dans les sédiments. Les résultats ont été exprimés en termes de volume pour tenir compte de la morphologie du lac. Les volumes, obtenus à la résolution annuelle, ont permis de reconstituer de manière quantitative l'évolution du régime de l'hypoxie dans l'hypolimnion des lacs depuis 150 ans. Une carotte longue sur le Bourget a en outre permis de constater qu'au cours des derniers 9000 ans le lac n'a jamais connu de phases d'hypoxie.

Les données limnologiques de l'observatoire ont permis de confronter et valider les reconstitutions sur plus de 50 années de recouvrement (Figure 18). Le marqueur fourni des reconstitutions moyennées annuelle de conditions d'oxygène. Pourtant, ce sont les variations pluri-décennales (et non annuelles) qui sont correctement reproduites. La limite de l'indicateur réside dans son incapacité à reproduire les variations au-dessous et au-delà de certaines concentrations d'oxygène (le marqueur plafonne lorsque les seuils sont dépassés), ce qui limite notamment la quantification des niveaux d'oxygène avant perturbation anthropique.

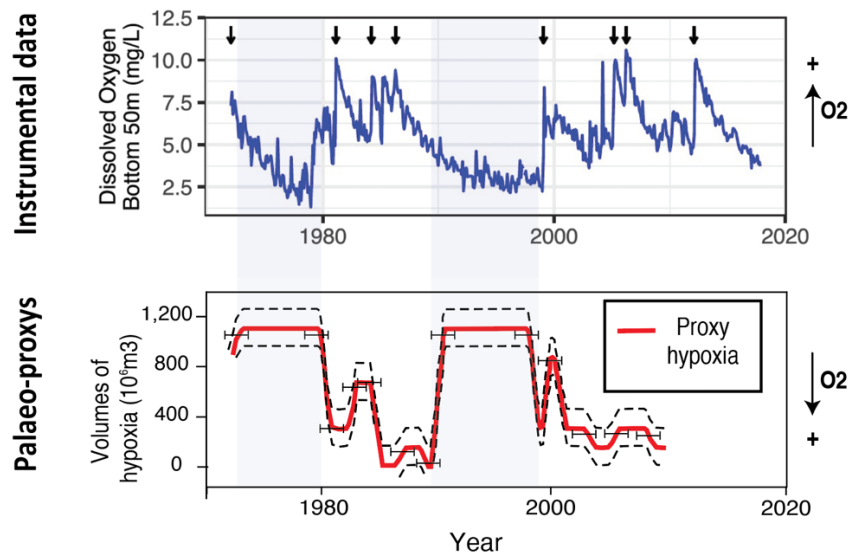


Figure 18. Évolution des concentrations d'oxygène dans la colonne d'eau du lac Léman depuis 1960. La courbe rouge correspond à la reconstitution des volumes d'hypoxie à partir des archives paléo-environnementales. Les courbes de reconstitution reproduisent correctement les deux périodes de diminution des conditions d'oxygène observées dans l'hypolimnion avec les données instrumentales (bleu).

En résumé

- Les marqueurs paléo-environnementaux de stocks et d'accumulation sédimentaire de carbone sont relativement nombreux et doivent ainsi être sélectionnés selon les objectifs d'étude. Dans le cas d'un objectif orienté vers la densification de données il est possible de recourir aux bancs automatiques de mesure de réflectance.
- Les proxys paléo-environnementaux offrent des reconstitutions précieuses, mais indirectes, des conditions environnementales passées, dont les limites doivent inciter à un contrôle renforcé notamment par la comparaison multi-proxys et par la confrontation avec les données instrumentales.
- Contrairement aux « proxys » paléo-environnementaux, les stocks et accumulations de carbone mesurés dans les archives sédimentaires fournissent des estimations directes de la séquestration de carbone dans les lacs, ce qui augmente le niveau de confiance dans les reconstitutions. Ce niveau de confiance dépend principalement de la qualité du modèle d'âge pour les estimations des taux d'accumulation sédimentaire de carbone. **Les stocks sédimentaires ne se reconstruisent pas, ils se mesurent directement.**
- Je propose que les limites, tant quantitatives que qualitatives, des reconstitutions basées sur les proxys paléo-environnementaux pourraient être à l'avenir compensées par la modélisation mécaniste.

9. Modèles hydrodynamiques et biogéochimiques lacustres 1D (GLM, MyLake, SIMSTRAT, AED2+)

Mes travaux recourent désormais au couplage des modèles hydrodynamiques et biogéochimiques lacustres afin de compléter les reconstitutions paléolimnologiques (Figure 19) (e.g. Itier-Desgué et al. 2023, Soares et al. 2024). Ces modèles permettent de simuler les conditions physiques et biochimiques verticalement dans la colonne d'eau. Mes programmes de recherches ont permis de caler ces modèles pour les quatre grands lacs de l'observatoire OLA et de développer une approche d'assimilation des données paléo-environnementales pour adapter ces modèles aux reconstitutions passées de long-terme.

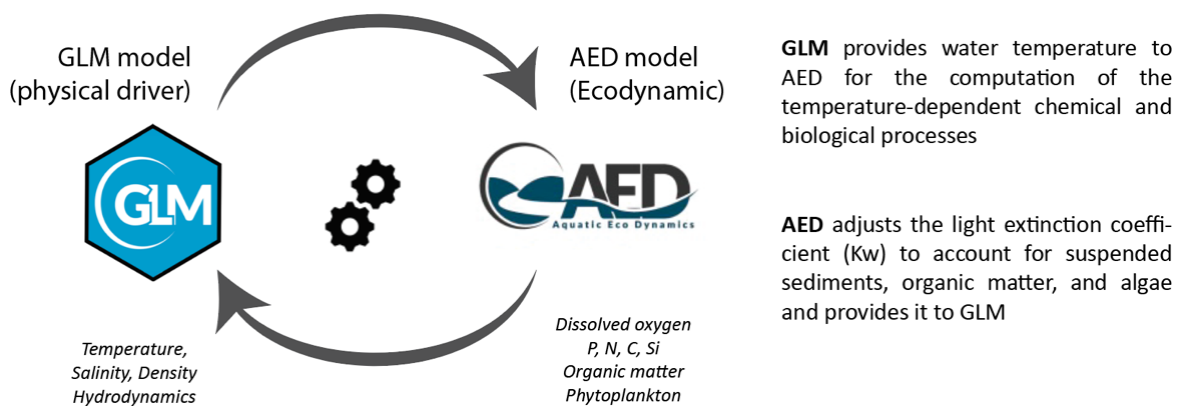


Figure 19. Couplage des modèles hydrodynamiques (e.g. GLM) et écodynamiques (e.g. AED)

Modèle hydrodynamique et thermique

Un modèle hydrodynamique uni-dimensionnel (1D) vertical est utilisé pour la réalisation des simulations sur l'ensemble de la colonne d'eau : le General Lake Model (GLM ; <https://github.com/AquaticEcoDynamics/GLM>). Le choix du modèle 1D permet de simuler le bilan hydrique et le régime de stratification des masses d'eau, permettant de caractériser la dynamique des eaux continentales avec précision (Hipsey et al., 2019). Développé par les scientifiques du Global Lake Observatory Network (GLEON), il s'applique à une grande diversité de lacs, présentant des morphologies et hydrologies variées. Il permet de simuler l'évolution des dynamiques thermiques s'exerçant sur les différentes couches de la colonne d'eau, en fonction des flux entrants et/ou sortants et des conditions climatiques. Sous l'effet de ces forçages, des propriétés physico-chimiques des tributaires du lac et des processus physiques induits, la densité de l'eau est affectée, ce qui modifie le gradient vertical de température (Figure 20). L'utilisation de la structure unidimensionnelle (1D) est justifiée dans le cas du lac d'Annecy en raison du rôle prédominant des variations saisonnières dans la stratification verticale du lac, concernant aussi bien les températures, l'oxygène, les nutriments et les métaux, ainsi que la dynamique du plancton.

Modèle biogéochimique

Dans le cas des lacs de l'observatoire OLA, le modèle hydrodynamique (GLM) calibré pour les lacs du Bourget, Annecy, Léman et Aigueblette (Desgué-Itier et al., 2023) a été couplé au modèle Aquatic Ecodynamics (Figure 20) (AED ; <https://github.com/AquaticEcoDynamics/glm-aed>), afin de simuler l'évolution de la qualité de l'eau du lac, de l'habitat et des cycles biogéochimiques. Le couplage des modèles est un processus dynamique qui permet au modèle GLM d'envoyer les conditions thermiques au modèle AED au pas de temps horaire pour qu'il puisse calculer les processus biogéochimiques dépendants de la température. Le modèle AED intègre les principaux processus aquatiques tels que la cinétique et l'équilibre des réactions chimiques et biologiques le long de la colonne d'eau et les échanges aux interfaces eau-atmosphère et eau-sédiments (Figure 20). Les modules utilisés dans mes études jusqu'à présent reproduisent les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore, les concentrations en oxygène, matière organique ainsi que les biomasses phytoplanctoniques.

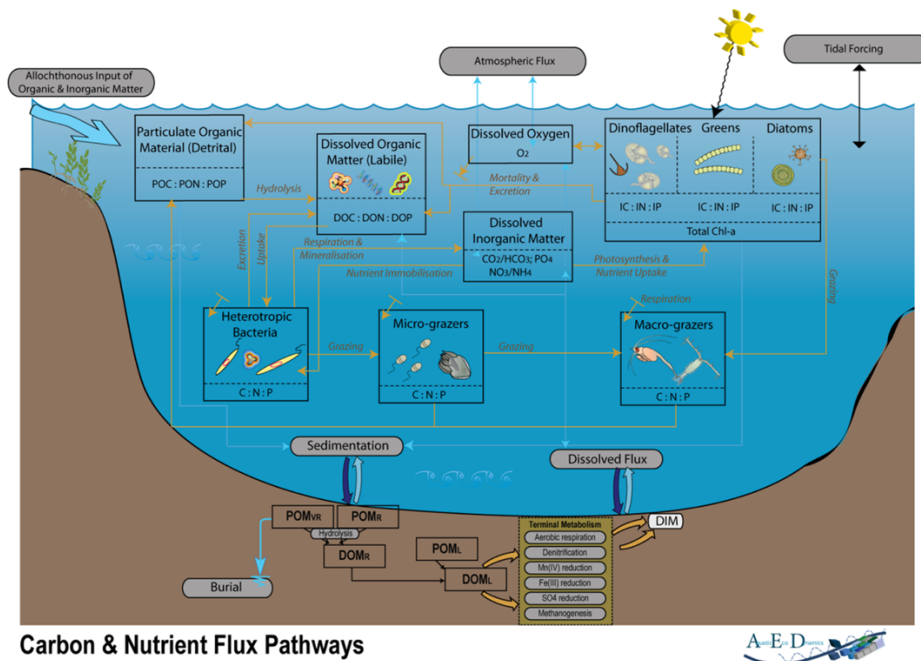


Figure 20. Schéma conceptuel du modèle AED (Aquatic Ecosystem Dynamics, Hipsey et al., 2013). Les différents modules et interactions au sein du modèle, et les divers processus dans les écosystèmes aquatiques. L'organisation modulaire permet une flexibilité dans le choix de représentation soit simples (partimonieuses) ou complexes (paramétrisation élevée), selon les besoins de l'étude.

10. Développement d'une méthode d'assimilation des données paléolimnologiques pour la modélisation

L'assimilation de données estime l'état le plus probable d'une variable en combinant les simulations de modèles et les observations passées. Récemment, l'assimilation de données a été appliquée pour reconstruire les paléoclimats (e.g., Franke et al., 2017 ; Goosse et al., 2010, 2012a ; Hakim et al., 2016, Tardif et al., 2019, Figure 21). Dans ce cas, nous ouvrons un peu la définition mathématique pour l'étendre à une démarche intégrant données limnologiques, paléolimnologiques et modèle mécaniste pour estimer l'état et les évolutions des systèmes lacustres. **Dans notre cas, une approche est proposée afin de simuler le fonctionnement lacustre et certaines réponses clés de ces milieux, notamment les stocks de phosphore, la production primaire, l'oxygène dissous, le carbone, etc.**

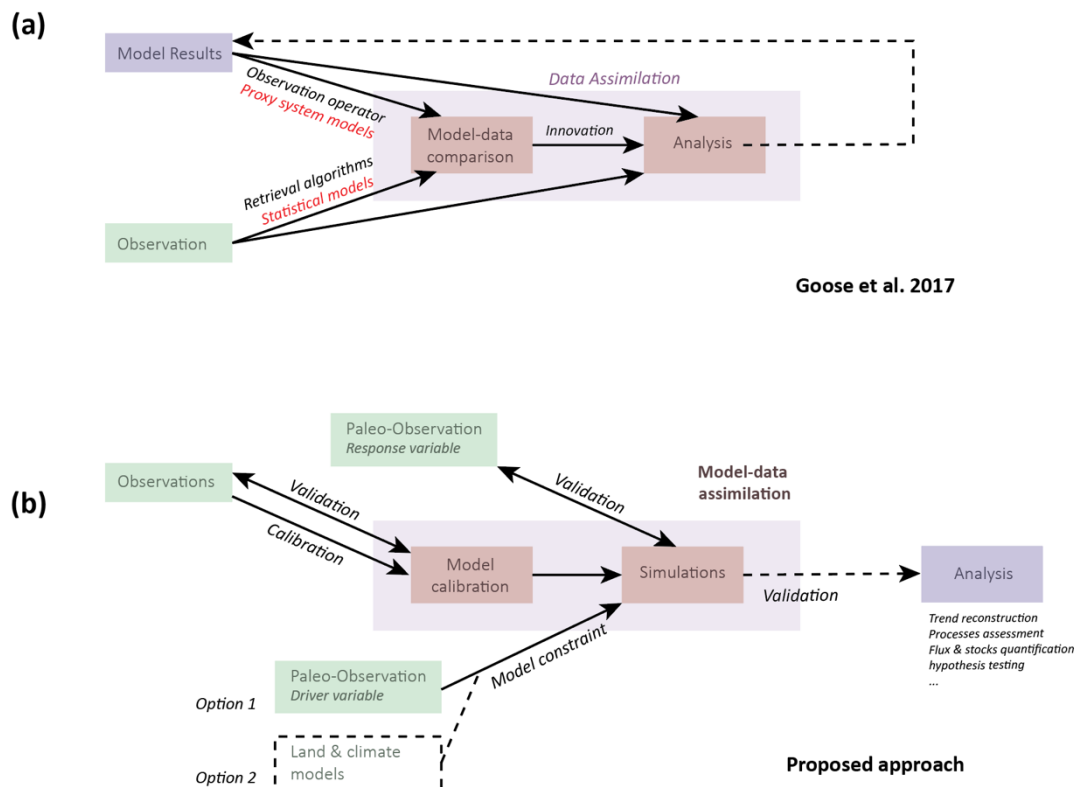


Figure 21. Repositionnement de l'approche d'assimilation proposée dans ce programme par rapport aux représentations de l'assimilation conceptualisée par Gosse et al. (2017). Contrairement à Gosse et al. (2017) la nouvelle architecture proposée intègre plus explicitement 1) les données d'observation issus des suivis instrumentaux, mais aussi 2) des données paléo-environnementales pour à la fois contraindre et valider les modèles dans le passé.

La nouveauté réside dans **1)** l'application d'une démarche d'assimilation adaptée aux systèmes lacustres, **2)** l'amélioration des données paléolimnologiques en vue de les intégrer dans les modèles mécanistes et **3)** l'augmentation du nombre de proxys pour réduire la volatilité des reconstitutions passées.

Synthèse de l'approche d'assimilation proposée

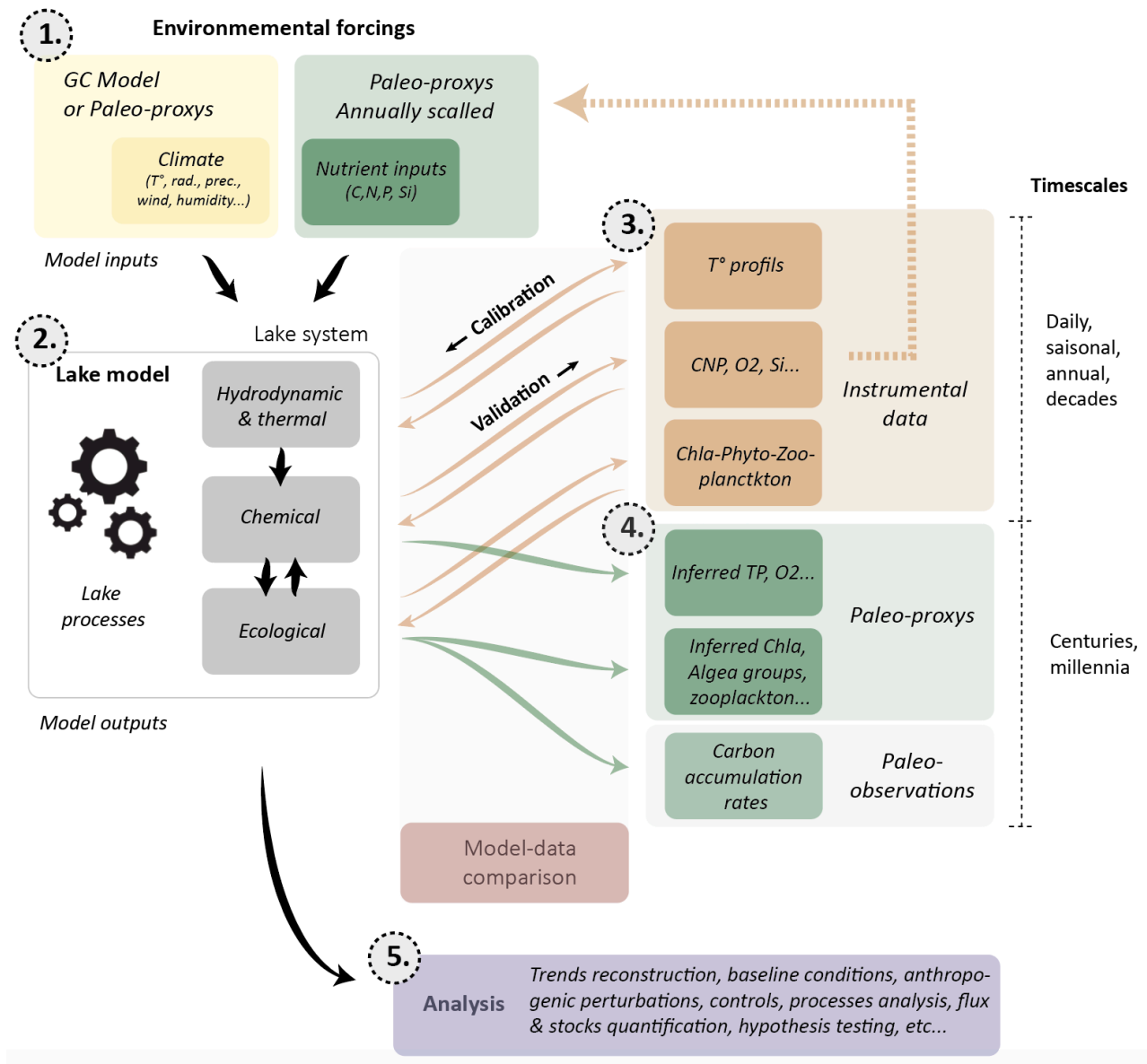


Figure 22. Concept général de l'assimilation développée dans ce programme : Les données de forçage environnemental (1) servent d'entrées au modèle mécaniste lacustre (2), qui est calibré/validé à partir des données instrumentales (3), puis validée une seconde fois pour le temps long à partir des données paléolimnologiques (4). Les sorties validées du modèle sont ensuite analysées pour répondre aux questions scientifiques (5).

L'approche d'assimilation peut être décrite par ses différentes composantes (Figure 22) :

- (1) Les données de forçage environnemental** correspondent aux variables externes qui contrôlent l'évolution du système lac sur le plan physique, chimique et biologique sur le long terme. Elles correspondent 1) à des données journalières climatiques, incluant T° de l'air, humidité relative, radiations solaire, précipitations, vitesse du vent. Ces données sont dérivées des modèles climatiques (Global circulation model GCM). Ces données présentent l'avantage d'être harmonisées, maillées, et au pas de temps souhaités, comme le pas journalier ou annuel. Les données de forçage correspondent aussi

2) à des données journalières de flux entrant de nutriment (C,N,P,Si) reconstitués à partir de proxys paléolimnologiques, comme les diatomées ou daphnies dans le cas des concentrations de phosphore. Les données instrumentales des affluents permettent quant à elles de mettre à l'échelle journalière les tendances centennales issues des proxys (méthode détaillée plus bas).

- (2) **Le modèle lacustre**, modulaire, basé sur les processus hydrodynamique et écodynamique, qui permet notamment de simuler les profils journaliers des conditions physiques (thermie), chimiques (e.g. concentrations en oxygène, carbone, phosphore...) et biotiques (e.g. phytoplancton, zooplancton...).
- (3) **Les observations issues des données instrumentales** qui permettent de calibrer et valider le modèle lacustre pour les échelles saisonnières, annuelles, voir décennales : profils de données limnologiques physiques (e.g. T° eau), chimiques (e.g. O₂, CNP, Si...) et écologiques (e.g.).
- (4) **Les observations issues des données paléo-environnementales** qui permettent de valider (mais pas de calibrer) le modèle lacustre pour les échelles décennales, centennales, millénales : proxy des conditions chimiques (e.g. concentrations hivernales de phosphore, conditions moyennes annuelles d'oxygénation, concentrations moyennes annuelles en chlorophylle)
- (5) **Les analyses des données de sortie** permettent de répondre aux questions scientifiques posées.

Présentation détaillée de la démarche d'assimilation modèles-données

Le modèle est contraint par des données climatiques (modèle climatique) et de flux de nutriments (paléoproxy). Puis, le modèle est validé par une ou plusieurs données paléo-environnementales. Dans notre étude il s'agit des données de production primaire (observation & paléoproxy) et de conditions d'oxygénation (observation & paléoproxy) (Figure 23).

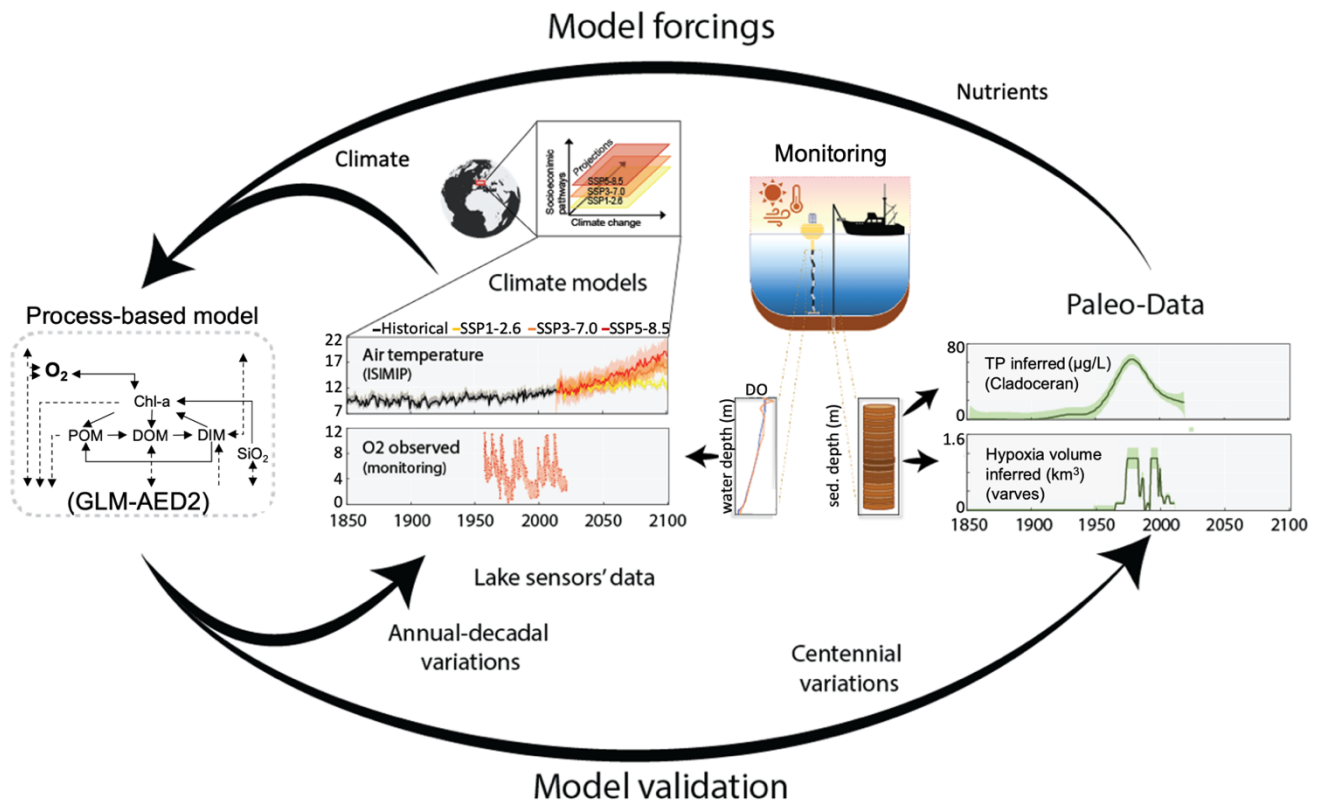


Figure 23. Principe de l'assimilation modèles-données développée pour les études long-terme. Les données paléolimnologiques et monitoring sont intégrées au modèle mécaniste pour simuler les apports de phosphore au lac ainsi que la réponse de l'hypoxie des lacs. Le modèle a été validé en utilisant des données limnologiques et paléolimnologiques indépendantes pour des échelles de temps courtes et longues.

Données d'entrées du modèle GLM-AED

Les données nécessaires à la conduite des simulations (bathymétrie, variables climatiques, débits et qualité de l'eau des affluents) ont été collectées auprès des institutions et agences gouvernementales françaises, des gestionnaires des lacs (i.e. CIPEL, SILA, CISALB, CCLA) et de divers organismes ou issues de la littérature scientifique (Tableau 1, Figures 24, 25). Le suivi limnologique des stations de mesure effectué au centre de chaque lac a été utilisé pour la calibration et la validation du modèle.

Tableau 3. Sources de données d'entrées du modèle GLM-AED.

Données d'entrées	Résolution	Période	Source
Bathymétrie	10 m	-	SILA, CIPEL, CISALB, CCLA
Variables climatiques	Journalier	1850 – 2100	Modèles des projections climatiques (Cucchi et al., 2020; Lange, 2019) https://www.isimip.org
<ul style="list-style-type: none"> Température de l'air Radiations solaires Vitesse du vent 	Journalier	1959 – 2020	SAFRAN (e.g. station Meythet) https://www.umr-cnrm.fr
<ul style="list-style-type: none"> Humidité relative Précipitations 	Journalier	2000 – 2011	MétéoSuisse (station Nyon/Changins) https://www.meteosuisse.admin.ch
<ul style="list-style-type: none"> Couverture nuageuse 	Journalier	2000 – 2011	MétéoSuisse (station Nyon/Changins) https://www.meteosuisse.admin.ch
Débits des rivières	Journalier	1972 – 2020	HydroPortail https://hydro.eaufrance.fr
Température de l'eau des rivières	Journalier	1965 – 2100	(Toffolon et Piccolroaz, 2015)
Qualité de l'eau des rivières (T° eau, O2 dissous, nitrates, ammonium, phosphates, silices réactives et carbone organique dissous)	Mensuel	2002 – 2020	Naïades https://naiades.eaufrance.fr
Données issues des suivis annuels OLA (T° eau, O2 dissous, nitrates, ammonium, phosphore total, carbone organique total, chlorophylle-a)	Mensuel - Bimensuel	1958 – 2020	OLA database https://si-ola.inrae.fr

Les données climatiques

Les données climatiques nécessaires aux simulations thermiques lacustres sont la température de l'air (°C), les radiations incidentes à ondes courtes ($W m^{-2}$), la vitesse du vent à une hauteur de 10 m de la surface du plan d'eau ($m s^{-1}$), la couverture nuageuse, l'humidité relative (%) et les précipitations ($mm j^{-1}$). Les chroniques temporelles de T°, de radiations et de vent sont issues du modèle climatique IPSL-CM6A-LR. La variabilité des autres variables climatiques (i.e. nuages, humidité et précipitations) n'est pas considérée, car le niveau de confiance dans les scénarios long-terme de ces variables est plus faible. Cette simplification est cohérente avec l'importance de la température de l'air, des radiations à ondes courtes et de la vitesse du vent dans les tendances au réchauffement des lacs périalpins, alors que toutes les autres variables météorologiques ont montré des effets faibles à négligeables (Schmid and Koster, 2016).

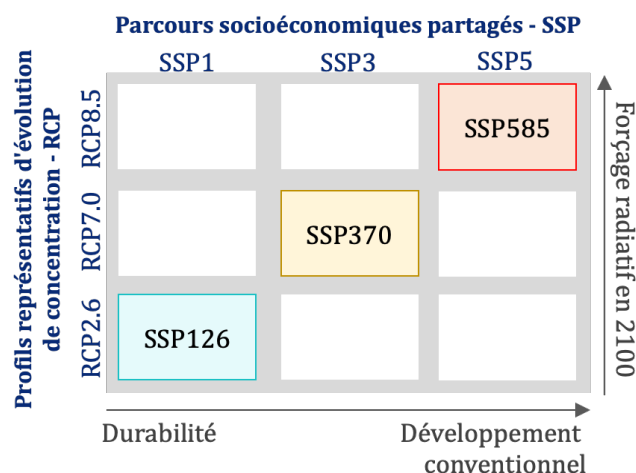


Figure 24. Schéma conceptuel des scénarios climatiques de forçages au modèle GLM-AED.

Le modèle a été alimenté par des projections climatiques mondiale de référence, issues du Programme mondial de recherches sur le climat (*World Climate Research Programme*, WCRP). Les projections climatiques proviennent plus spécifiquement du Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés (CMIP pour *Coupled model intercomparison project* en anglais). Ces données globale sont généralement ajustées et mises à l'échelle locale par les équipes de recherche sur le climat (e.g. méthode ISIMIP3BASD ; pour atteindre une résolution de 50 km) (Cucchi et al., 2020; Lange, 2019) (Figure 24).

Les données climatiques correspondent à des données historiques et à différents scénarios futurs relatives aux Trajectoires Socio-économiques Partagées, ou en anglais *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) : SSP126 (SSP1-RCP2.6), SSP370 (SSP3-RCP7.0) et SSP585 (SSP5-RCP8.5) projetés jusqu'en 2100. Ils correspondent à des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre associés à différentes politiques climatiques (Riahi et al., 2017). Par leur dimension scioéconomique, les SSPs viennent compléter les scénarios physiques strictement basés sur les trajectoires de forçage radiatif appelés Trajectoires Représentatives de Concentration ou *Representative Concentration Pathways* en anglais (RCPs), dont les valeurs sont comprises entre 2,6 et 8,5 W m⁻² (van Vuuren et al., 2011). Les SSP126-370-585 sont utilisés dans le cas de mes études, combinant ainsi SSPs et RCPs.

Les débits des affluents

Les débits quotidiens des affluents dans les lacs de OLA ont été estimés en se basant sur les suivis à long terme des débit des exutoires, comprenant par exemple dans le cas du Léman 102 années de mesures. Les débits mensuels des exutoires sont interpolés linéairement pour obtenir une série chronologique quotidienne. Les débits quotidiens moyens sur la période sont calculés et reproduit de 1850 à 2100. Comme la plupart des grands lacs alpins naturels le niveau des lacs est régulé depuis au moins un siècle. Ces variations sont négligeables en terme de volume total du lac (e.g. ne représentant que ~0,3 % dans le cas du Léman). Il est ainsi supposé que les débits des affluents sont équivalent aux débits des effluents, et que cette hypothèse ne compromet pas la simulation des dynamiques thermiques. Par conséquent, tous les apports dans le lac ont été entrés dans le modèle en tant qu'un seul débit d'influent combiné.

Température et oxygène dissous

La température de l'eau des affluents a été calculée à partir des relevés de température de l'air et des débits, à l'aide du modèle air2stream (Toffolon and Piccolroaz, 2015). Les concentrations en oxygène dissous (DO) dans les affluents ont été estimés à partir de la température de l'eau (Mortimer, 1981), en supposant que la saturation en oxygène était de 100% (e.g. Jones et al., 2018; Calamita, 2020).

$$DO = \exp(7.71 - 1.31 \ln(T + 45.93))$$

DO correspondant à la concentration en oxygène dissous (mg L⁻¹) et T la température de l'eau (°C)

Ces données ont été calibrées et validées en les confrontant aux données mensuelles d'observation des tributaires principaux (Naiades, 2022). Les températures et DO sont ensuite calculées à partir de la température de l'air pour les 3 scénarios climatiques.

Les concentrations journalières en chlorures, nitrates, ammonium, phosphates, silices réactives et carbone organique dissous dans les tributaires ont été obtenues par interpolation linéaire entre mesures

mensuelles dans les affluents sur la période instrumentale (Naiades, 2022). Cette méthode a déjà été utilisée dans d'autres applications (e.g. Burger et al., 2008; Özkundakci et al., 2011) mais cette fréquence d'échantillonnage ne permet pas de capter les événements extrêmes tels que les crues.

En l'absence de données disponibles sur les éléments nutritifs organiques, elles ont été calculées à partir des concentrations d'éléments nutritifs inorganiques, en séparant les fractions dissoutes (D) et particulaires (P) selon les équations suivantes (e.g. Fenocchi et al., 2019):

$$\text{DON ou PON} = (\text{TN} - \text{NH}_4 - \text{NO}_3) / 2$$

$$\text{DOP ou POP} = (\text{TP} - \text{PO}_4) / 2$$

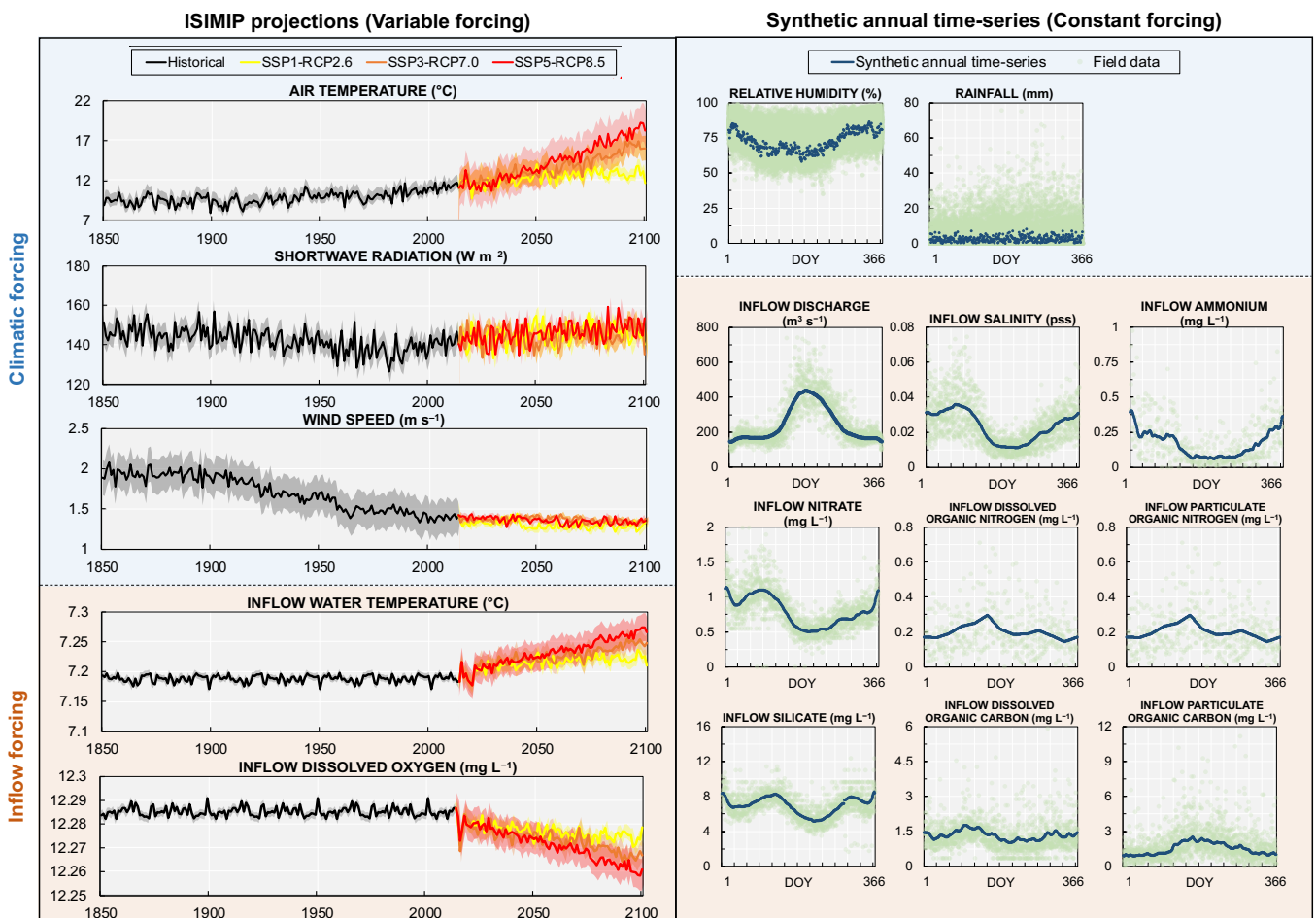


Figure 25. Données d'entrée du modèle GLM-AED2 dans le cas du lac Léman de 1850 à 2100. A) débit d'affluent et d'effluent, b) salinité, c) température de l'eau, d) oxygène dissous, e) ammonium, f) nitrate, g) silicate, h) carbone organique dissous, i) carbone organique particulaire, et j) azote organique dissous et particulaire.

Modifier et enrichir les données paléolimnologiques en vue de les intégrer dans les modèles mécanistes.

Aucune donnée relative aux concentrations en nutriments dans les affluents n'est disponible avant la période instrumentale. Ainsi, afin de tenir compte des variations de niveau trophique sur le temps long, nous avons eu recours aux proxys paléo-environnementaux de reconstitutions du phosphore total passés dans l'eau basés sur les assemblages fossiles et les fonctions de transfert (Berthon et al., 2013). Ces études recourent aux déterminations des assemblages de diatomées ou de Daphnies fossiles qui sont utilisés comme des indicateurs d'enrichissement en nutriment (Berthon et al. 2013). Les concentrations de TP du lac dépendent directement des apports de TP par les rivières. Un facteur de correction a ainsi été identifié et appliqué aux reconstitutions de TP d'eau du lac issues des fossiles afin d'estimer la concentration de TP dans les affluents (Figure 26).

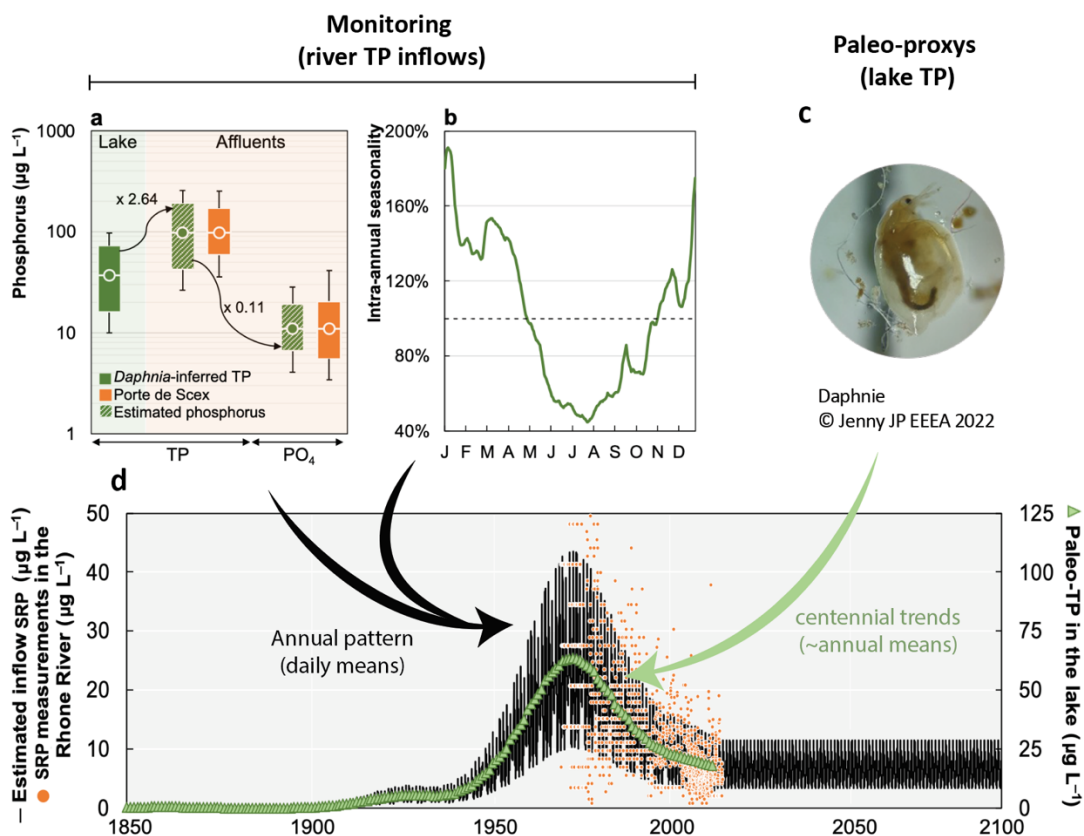


Figure 26. Reconstruction des apports journaliers de phosphore dans le lac Léman de 1850 à 2100. A) Conversion des enregistrements annuels de TP paléolimnologiques du lac en phosphore soluble réactif (SRP) dans les affluents ; b) Saisonnalité intra-annuelle synthétique du phosphore réactif dans les affluents (station de surveillance de Porte de Scex) ; c) Courbe de reconstitution paleo-environnementale de TP de l'eau du lac à partir des fossiles de Daphnie (Berthon et al. 2013), d) Apport quotidien de phosphore réactif dans le lac.

Les concentrations moyennes annuelles en nutriments dans les affluents ont ensuite été calculées en fonction des ratios PO_4/TP , NO_3/TP , NH_4/TP et RSi/TP dans l'Eau Morte pour la période 2007–2021. Les variations journalières par rapport à la moyenne annuelle ont été calculées afin d'établir une saisonnalité

intra-annuelle. Sur la période 2021–2100 nous avons suggéré que les apports de nutriment ne changeront pas par rapport à ceux émis et mesurés en 2020, en cohérence avec les objectifs de maîtrise des rejets et de traitement des eaux usées.

Calibration & validation des modèles

Le modèle GLM-AED est calibré et validé à partir des variables d'état considérées comme les plus importantes pour caractériser la qualité de l'eau du lac : température de l'eau, oxygène dissous, phosphore total et chlorophylle-a (Wetzel, 2001). Une calibration manuelle puis automatique, basée sur l'algorithme d'optimisation CMA-ES (stratégie d'évolution de l'adaptation de la matrice de covariance ; (Hansen, 2016), est appliquée afin de reproduire au mieux l'amplitude, les variations saisonnières et interannuelles, les phénomènes extrêmes et les tendances long-terme de chacune de ces variables. Les variabilités temporelles et saisonnières des autres nutriments (ammonium, nitrates) et du carbone organique total sont reproduites avec un niveau d'incertitude plus élevé.

Le modèle est calibré sur une période de 10 ans dans le cas des lacs de l'observatoire OLA, puis validé sur une ou plusieurs autres périodes distinctes. Différentes métriques sont alors calculées pour évaluer la performance du modèle (écart quadratique moyen - RMSE, écart quadratique moyen normalisé - RRMSE, erreur absolue moyenne - MAE, coefficient de corrélation de Pearson - r et pourcentage de biais - PBIAS) en comparant les résultats issus de la modélisation aux observations au niveau du point le plus profond du lac (station de mesure des suivis OLA), sur l'ensemble de la période de monitoring.

11. La place centrale des observatoires des lacs pour valider les marqueurs paléolimnologiques et les modèles

Infrastructure OLA : Observation long terme et expérimentation - écosystèmes LAcustres

L'infrastructure OLA est atout stratégique très structurant pour mes recherches, notamment pour le développement et la valorisation d'approches de modélisation et paléoenvironnementales. L'infrastructure OLA met à la disposition des scientifiques des données scientifiques de qualité et de long-terme dans l'objectif de comprendre et de modéliser l'évolution et les fonctions écologiques de ces systèmes. Des suivis limnologiques sur 28 lacs français sont bancarisés dans le système d'information SI-OLA d'AnaEE-France (https://si-ola.inra.fr/si_lacs/login.jsf) et offrent plusieurs décennies de suivi instrumentales de la colonne d'eau des lacs (physico-chimie, phytoplancton, zooplancton, poissons, etc.) et des tributaires (débits, physico-chimie, charge sédimentaire, flux spécifiques de nutriments).

Quatre grands lacs péri-alpins (Annecy, Bourget, Léman et Aiguebelette, Figure 27) sont surveillés depuis sept décennies avec des campagnes de terrain mensuelles et constituent ainsi les sites d'étude principaux pour OLA. Ils fournissent des contextes exemplaires, caractérisés à la fois par un retour plus ou moins rapide et complet à l'état oligotrophe (résultant de progrès dans la gestion environnementale du phosphore) et par l'accentuation de perturbations locales ou globales (urbanisation du bassin versant, apports de micro-polluants, réchauffement climatique, ...).

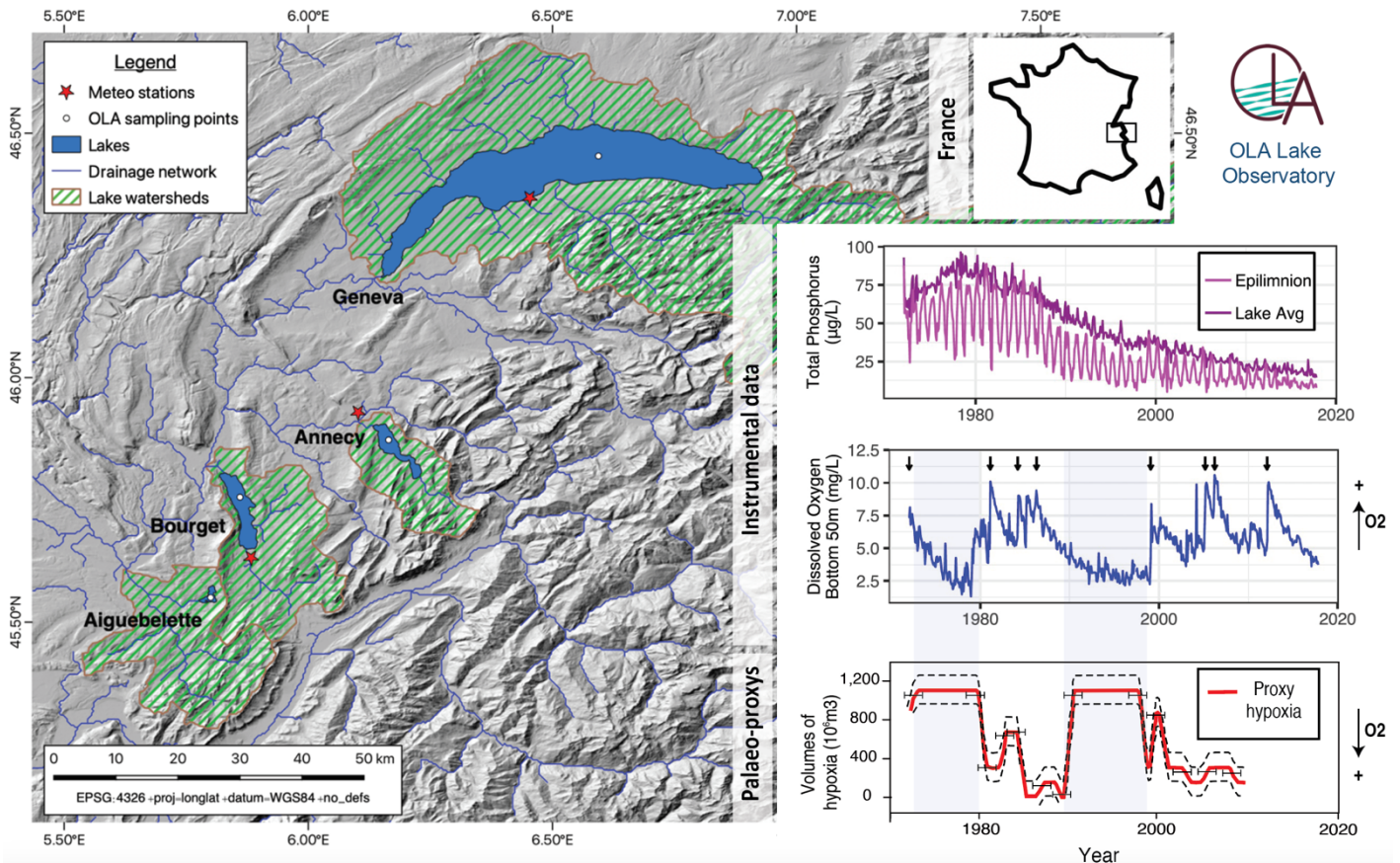


Figure 27. Localisation des 4 grands lacs périalpins de l'observatoire des lacs (OLA). Les données instrumentales sur plusieurs décennies, ainsi que les variations marquées de conditions du milieu, permettent d'éprouver et améliorer les reconstitutions paléolimnologiques et les modèles (e.g. corroboration dans le cas du lac Léman des conditions d'oxygène de la colonne d'eau mesurées et reconstituées à partir des proxys paléolimnologiques).

Ces lacs en dépit de leur proximité géographique et la parenté de leurs environnements physiques et humains (même éco-région et contexte de développement selon Cristofini et al., 1994) présentent toutefois des spécificités (temps de séjour des eaux, géographie du bassin versant, structure des réseaux trophiques...) qui rendent pertinente une analyse comparée des trajectoires de ces systèmes. **Les suivis de l'observatoire des lacs OLA sont parmi les plus long existant dans le monde, ce qui en fait des sites privilégiés d'étude des changements à long-terme et des candidats idéaux pour le développement d'approches du long-terme intégrant modélisation et données paleo-environnementales.**

Tableau 4. Caractéristiques des quatre sites de l'observatoire OLA

	Geneva	Annecy	Bourget	Aiguebelette
Location	46°27'; 6°32'	45°86'; 6°17'	45°43'; 5°52'	45°33'; 5°48'
Mean/Max depth (m)	154/309	41/65	85/145	31/70
Area (km ²)	581.3	27.59	44.5	5.45
Mean elevation (m.a.s.l.)	372	447	232	390
Residence time of water (yrs)	11.3	3.8	9	3.1
Mixing regime	mono-mero-mictic	monomictic	monomictic	monomictic
Trophic state	Mesotrophic	Oligotrophic	Oligo-mesotrophic	Oligo-mesotrophic

Une complémentarité forte avec le Réseau mondial des Observatoires des Lacs GLEON

Le Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) est une organisation mondiale de chercheurs qui ont uni leurs efforts pour créer un réseau international d'observatoires lacustres. Ce réseau vise à collecter des données biologiques, chimiques et physiques à l'échelle mondiale. **Bien qu'il contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement et de l'évolution des lacs au cours des dernières années et décennies, les données paléoenvironnementales y sont encore peu, voire pas du tout, intégrées.** Cette base de données, qui regroupe des informations sur de nombreux lacs, permet d'étudier les facteurs influençant les processus variables quotidiens, saisonniers ou annuels des lacs à des échelles régionales, continentales et mondiales. Le réseau GLEON a déjà permis la réalisation de nombreuses études de modélisation, notamment sur la dynamique thermique des lacs (Figure 28). **Il serait envisageable, à terme, d'intégrer aux démarches du GLEON les approches de rétro-observation et d'assimilation développées à l'échelle de l'Observatoire des Lacs Alpains (OLA) pour ouvrir de nouvelles perspectives d'exploration des systèmes lacustres à des échelles multiples jamais entreprises auparavant.**

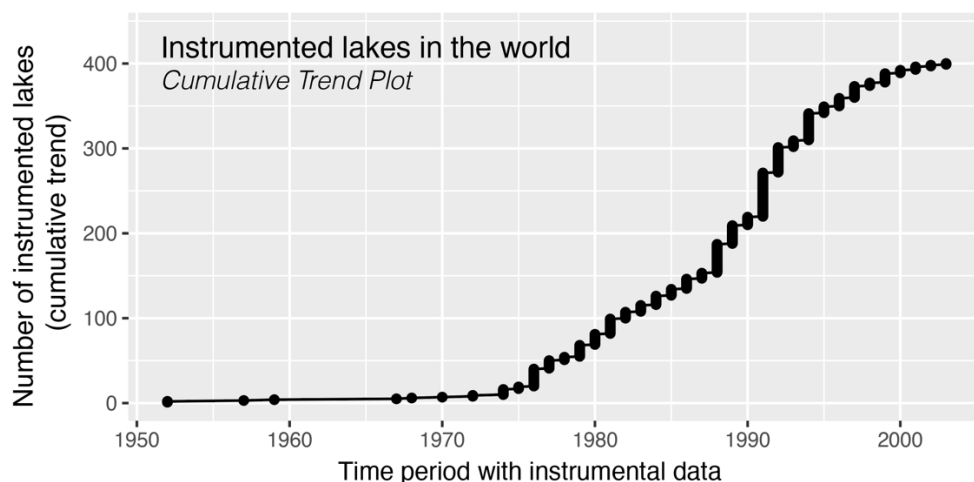


Figure 28. Nombre de lacs et période couverte par les suivis instrumentaux dans GLEON. Les suivis débutent dans la seconde moitié du XXIème siècle et s'étendent en général sur une à plusieurs décennies. Les suivis de l'observatoire des lacs OLA sont parmi les plus long existant dans le monde, ce qui en fait des sites privilégiés d'étude des changements à long-terme et des candidats idéaux pour le développement d'approches du long-terme intégrant modélisation et données paleo-environnementales.

Depuis mon doctorat, l'observatoire OLA est au cœur de toutes mes recherches. Il constitue à la fois une base sécurisante et une piste de départ pour l'ouverture vers des projets internationaux. Les prochains chapitres, orientés vers les résultats de recherche, présentent comment de nouvelles compréhensions et de nouvelles approches méthodologiques ont émergés de mes études autour de l'observatoire OLA, notamment autour des conditions d'oxygénation et de cycle du carbone.

Section 2.3 – Perturbation des conditions de préservation du carbone au cours du XXe siècle

Sommaire de cette section :

- *Un premier volet questionne la mise en place historique de l'hypoxie dans les lacs de l'Observatoire OLA (Bourget, d'Annecy et Léman) au cours des derniers 200 ans. Il concerne les travaux de retro-observation réalisés dans le cadre de mon doctorat sous la direction de Fabien Arnaud (CNRS-EDYTEM) et Jean-Marcel Dorioz (INRAE-CARTELE). L'étude cherche plus particulièrement à :*
 - *Valider un proxy des conditions d'oxygénation à partir des suivis limnologiques*
 - *Mettre en évidence la mise en place historique de conditions hypoxiques lacustres*
 - *Identifier les contrôles de l'hypoxie liés à l'eutrophisation et au climat*

- *Un second volet cherche à généraliser les résultats obtenus en thèse par l'intégration de nouveaux sites à l'échelle globale. Ce volet concerne un exercice de méta-analyse réalisé dans le cadre de mon postdoctorat sous la direction de Pierre Francus (INRS) au Canada. L'étude entreprend de :*
 - *Proposer une reconstitution de la mise en place historique de l'hypoxie dans le monde*
 - *Identifier à cette échelle les contrôles de l'hypoxie liés à l'eutrophisation et du climat*

- *Un troisième volet, réalisé dans le cadre du même postdoc au Canada, a permis de recentrer l'analyse autour des lacs Européens dont l'histoire relativement commune de l'eutrophisation permet de creuser plus spécifiquement l'origine des sources de phosphore qui ont contribué au développement de l'hypoxie. L'étude cherche plus spécifiquement à :*
 - *préciser la dynamique temporelle de l'hypoxie en Europe*
 - *différencier la contribution des sources diffuses et ponctuelles de phosphore dans le développement historique de l'hypoxie des lacs*

Contexte, objectifs et motivation

L'oxygène dissous est un paramètre fondamental des lacs et des cours d'eau (Marcé et al., 2024; Wetzel, 2001) qui a des implications importantes sur le devenir du carbone dans les lacs. Dans des conditions hypoxiques, le taux d'accumulation sédimentaire du carbone organique particulaire (POC) est plus élevé, tout comme l'élimination des nitrates (NO₃⁻) en N₂ via la dénitrification Figure 29. Cependant, l'hypoxie favorise également la production de méthane (CH₄), un puissant gaz à effet de serre, ainsi que des flux plus importants de carbone organique dissous (COD), d'azote (N), de phosphore (P), de fer (Fe) et de manganèse (Mn) des sédiments vers la colonne d'eau. Par conséquent, l'hypoxie a des effets à la fois positifs et négatifs sur la séquestration de carbone dans les lacs. En outre l'oxygène dissous conditionne également les habitats des espèces biologiques, des cycles géochimiques. Ainsi, comprendre la dynamique de l'oxygène est essentielle pour mieux appréhender le devenir du carbone dans les lacs.

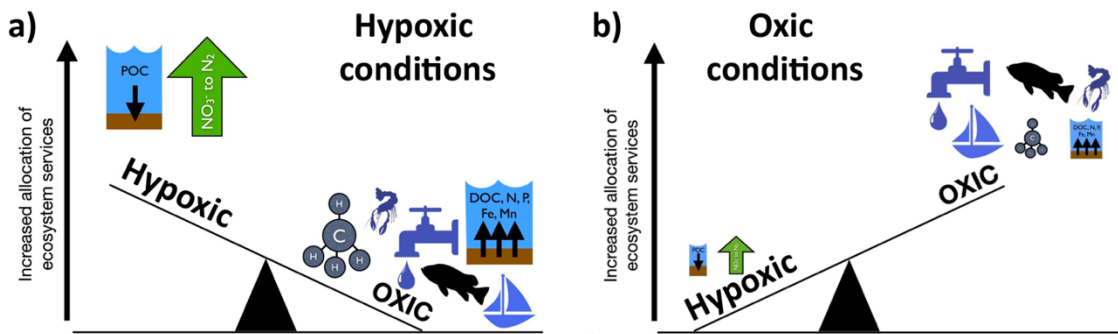


Figure 29. Principaux changements attendus dans le fonctionnement des lacs et le devenir du carbone en réponse à l'augmentation ou diminution de l'oxygène dissous, en suivant les définitions des services écosystémiques de Carey, (2023) <https://doi.org/10.1080/20442041.2023.2239110>.

Dans ce cadre mes travaux de thèse et de postdoctorat sur l'oxygène ont permis de mieux appréhender les modalités de variations passées, de perturbation et les causes de d'hypoxie, qui auront une importance essentielle pour la séquestration de carbone.

12. Mise en place historique de l'hypoxie dans les lacs de l'Observatoire OLA

Mon travail doctoral a contribué à identifier et à hiérarchiser les forçages globaux et locaux impliqués dans les perturbations des écosystèmes aquatiques des derniers 300 ans. Pour cela j'ai utilisé une démarche de rétro-observation sur 300 ans à partir des sédiments lacustres. L'enjeu de ce travail était de développer une approche qui soit appropriée au contexte de dépôts des grands lacs périalpins (Figure 30) et qui permette de reconstituer un signal continu, quantifié et de résolution annuelle, pour 3 variables environnementales : 1) le niveau trophique, 2) le régime des flux allochtones et 3) la dynamique de l'hypoxie. Le défi technique et opérationnel a consisté à prélever, dater et analyser 81 carottes sédimentaires provenant des plus grands lacs de France et de Suisse (Lacs Léman, Bourget et Annecy). Les analyses statistiques (ML, GLM, GAM) ont permis d'étudier les forçages.

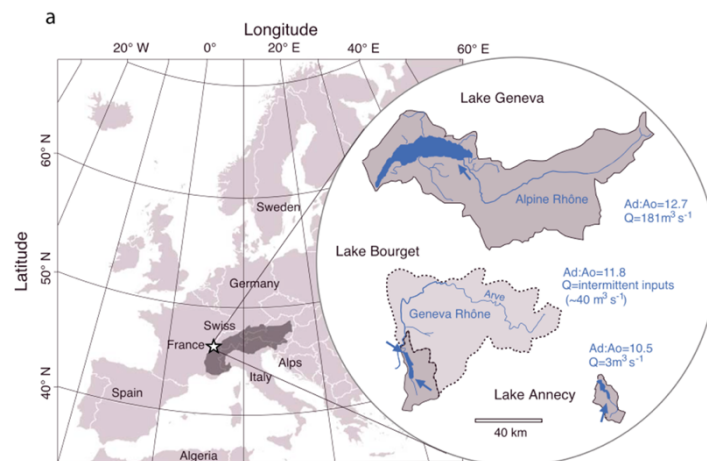


Figure 30. (a) Localisation des lacs Léman, Bourget et Annecy dans lesquels ont été reconstitué et validé les conditions d'oxygénation à partir des proxys sédimentaires.

Ce travail doctoral s'inscrivait dans le programme IPER-RETRO (ANR VMCS 008) coordonné par Marie-Elodie Perga (UNIL, Lausanne), né de la collaboration de paléolimnologues, de géologues et d'écologues spécialistes des lacs péri-alpins. Le programme a permis de confronter et d'analyser les interactions entre conditions géochimiques du lac (flux terrigènes, flux de carbone, oxygénation de la colonne d'eau) et fonctionnement des communautés biologiques (Diatomées, Cladocères, Chironomes). Au cours de ce projet j'ai développé un indicateur sédimentaire de l'hypoxie et j'ai conduit la reconstitution et l'analyse des conditions d'oxygénation de ces grands lacs (Figure 31).

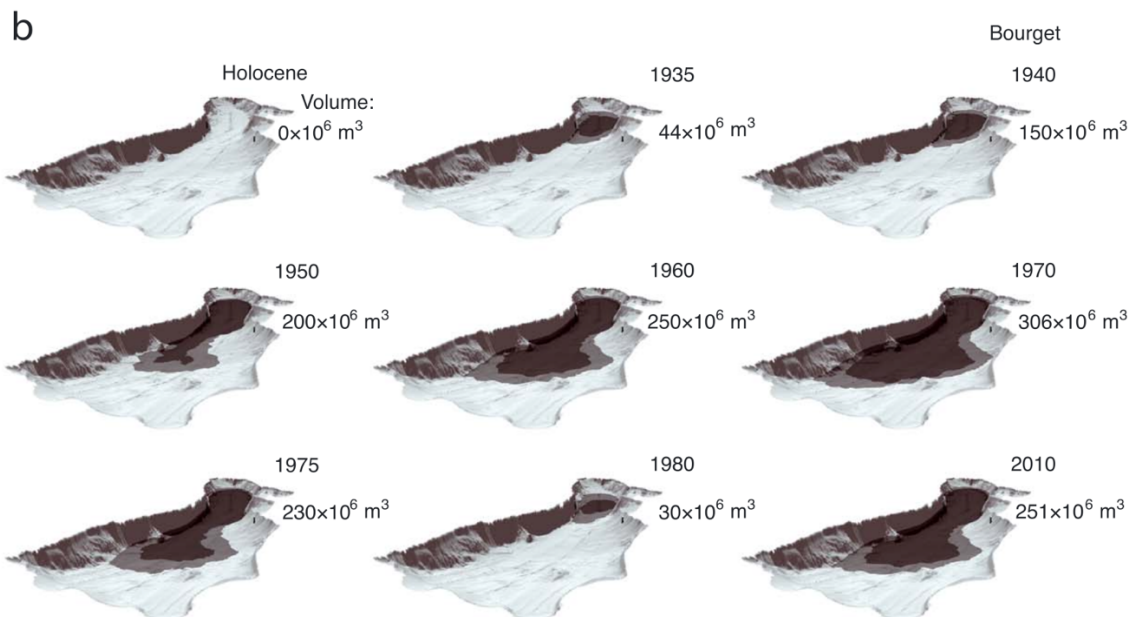


Figure 31. Mise en évidence de conditions bien oxygénées au cours des derniers milliers d'années et mise en place et évolution des volumes hypoxiques au cours depuis 1933 dans le lac du Bourget. L'hypoxie au fond du lac ne disparaît pas depuis sa mise en place historique en 1933, néanmoins on observe des variations décennales d'extension et de contraction des volumes hypoxiques. Le maximum d'extension de l'hypoxie indiqué par notre proxy sédimentaire représente jusque 8% du volume d'eau du lac (Jenny et al. 2014).

Les oscillations de l'hypoxie sont conséquentes, admettant par exemple dans le cas du Bourget des valeurs minimum de 0 m³ et des valeurs maximum proches de 400×10⁶ m³, soit de 0 à 8 % du volume total d'eau du lac. Remarquons que si le volume maximum d'eau hypoxique est plus important dans le lac du lac Léman, les proportions en revanche sont plus importantes dans le Bourget que dans le Léman.

Les 3 lacs ne présentent pas d'hypoxie avant les premiers signes d'enrichissement du milieu en phosphore. On remarque que dans les 3 lacs l'initiation de l'hypoxie correspond à une phase d'enrichissement très faible en phosphore (15 µg P L⁻¹±5). Ce phénomène est plus marqué encore dans les lacs du Bourget et d'Annecy. L'initiation de l'hypoxie dans le Léman est également immédiate après les premiers enrichissements, néanmoins, il faut attendre un enrichissement plus conséquent en P pour que les volumes hypoxiques deviennent plus importants (> 200×10⁶ m³). On peut invoquer les dimensions du lac, dans le cas du Léman, comme cause possible de ce décalage dans l'augmentation des volumes hypoxiques.

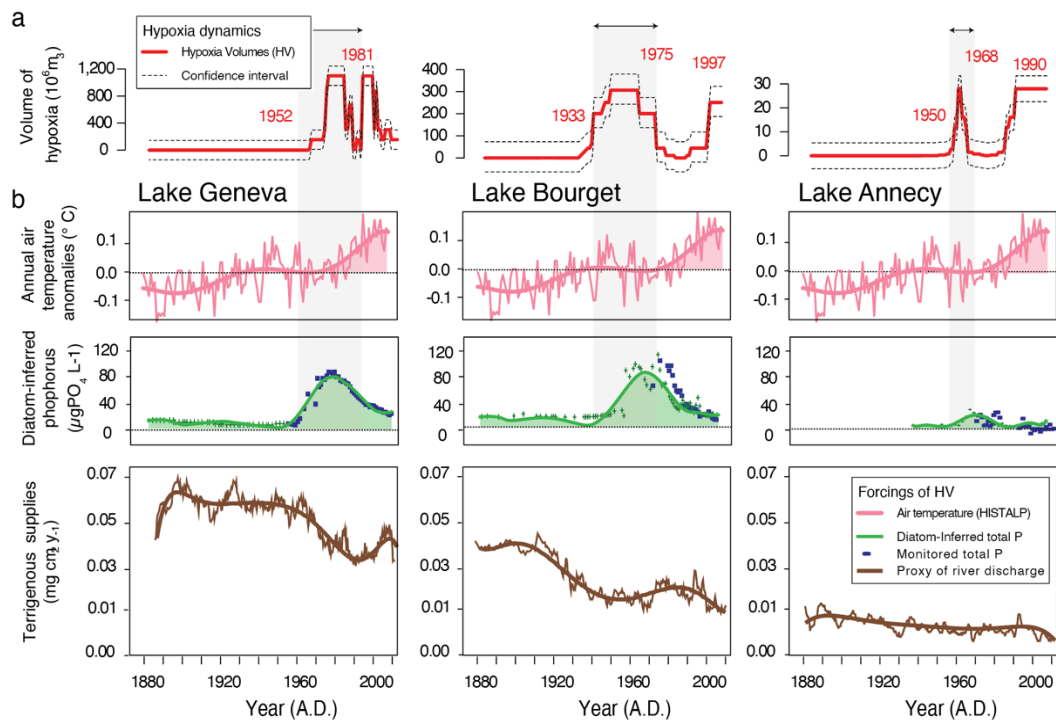


Figure 32. Évolution des volumes hypoxiques (a) et de ses contrôles (b) au cours des 130 dernières années mis en évidence par les modèles additifs généralisés. Par exemple, dans le lac d'Annecy, l'expansion de l'hypoxie dans les années 1960 s'explique par l'augmentation du P ; la diminution ultérieure de l'hypoxie dans les années 1980 s'explique par la restauration du P, et la réexpansion de l'hypoxie à partir des années 1990 s'explique par l'augmentation des températures).

Au cours des derniers milliers d'années les 3 lacs n'ont pas connu d'extension de l'hypoxie. L'hypoxie est apparue en 1950 ± 2 dans le Léman, en 1933 ± 2 dans le Bourget et en 1952 ± 2 dans Annecy. Des phases de contraction de l'hypoxie (à l'échelle pluriannuelle et/ou décennale) pourraient laisser penser à un retour de meilleures conditions d'oxygénation. Pourtant, l'observation des séries temporelles sur 150 ans permettent d'affirmer qu'aujourd'hui les 3 lacs sont en situation hypoxiques. En effet, les contractions de l'hypoxie ne conduisent pas à un retour complet à de bonnes conditions d'oxygénation. L'état de l'hypolimnion semble par conséquent s'être stabilisé depuis un peu plus d'une cinquantaine d'années.

La mise en place de l'hypoxie au milieu du XXe siècle est attribué à l'enrichissement en phosphore. Les phases d'oscillation de l'hypoxie qui ont suivies (contractions et/ou extensions) ne sont en revanche pas expliqués par les variations des concentrations de P. A ce stade de la réflexion, on se pose la question des forçages impliqués dans les fluctuations de l'hypoxie.

L'utilisation du modèle additif généralisé (GAM) nous a permis de déterminer les forçages globaux et locaux contrôlant l'hypoxie (Figure 32). **Nos résultats montrent que le climat à une action significative sur l'extension de l'hypoxie dès lors que le milieu a connu un enrichissement préalable en phosphore. De plus, les résultats montrent que les températures ont un effet d'autant plus fort sur l'extension de l'hypoxie que le contexte hydrique local du lac est faible. Nous montrons en effet que les périodes d'intensification du régime des crues contribuent de manière significative à la réduction de l'hypoxie.**

Par conséquent, les forçages des températures et des crues doivent être pris en compte conjointement dans l'étude du régime de l'hypoxie.

En résumé

- Les archives sédimentaires longues et courtes (e.g. Arnaud et al. 2012, Kremer et al. 2012, Jenny et al. 2013, 2014) indiquent que les lacs périalpins étaient bien oxygénés dans l'intégralité de leur colonne d'eau sur la période de l'Holocène.
- La mise en place d'une hypoxie des eaux du fond s'est produite dans les années 1930 à 1950. Cette hypoxie est inédite à l'échelle des derniers milliers d'années et marque une transition des lacs périalpins vers un nouvel état altéré de leurs conditions d'oxygénation.
- La mise en place historique de l'hypoxie est expliquée par l'augmentation des apports de nutriments vers le lac, plus particulièrement lorsque les concentrations de phosphore dans l'eau du lac ont dépassées la limite des $15 \mu\text{g L}^{-1}$. Cette mise en place dans les lacs périalpins s'est produite bien avant le début du réchauffement climatique suprarégional dans les années 1970.
- Alors que la mise en place de l'hypoxie est expliquée par les apports de nutriments, les variations post-mise en place semblent contrôlées par d'autres variables environnementales, liées au climat, régime hydrologique et températures, qui altère notamment le régime de stratification et limite le réapprovisionnement en oxygène des eaux du fond.

→ Nouvelle question soulevée par l'étude : La mise en place de l'hypoxie des lacs est-elle spécifique aux lacs périalpins ou est-ce que cette mise en place est généralisée plus large échelle ?

13. Mise en place historique des conditions hypoxiques dans les lacs du monde

A la fin de ma thèse je décide d'exporter un nouveau proxy de l'eutrophisation (c.f., projet doctorat) à l'échelle globale et d'acquérir de nouvelles compétences sur l'analyse géochimique et physique haute résolution sur sédiments. Je me suis tourné vers le Pr Pierre Francus qui possède un large réseau de collaboration international et qui possède un laboratoire de pointe pour l'analyse haute résolution (CT-Scan, scan XRF, MEB). Cette étude s'est réalisée dans le cadre d'un postdoctorat au Centre Eau Terre Environnement, INRS, Québec (Qc), Canada, avec la collaboration d'Irene Gregory-Eaves (McGill), F. Arnaud (EDYTEM), ME. Perga (INRAE CARTELE), du Centre de recherche en géochimie et géodynamique du Québec (GEOTOP), et le Varve Working group (VWG) du groupe international *Past Global Change* (PAGES). Cette recherche a été financée sur mes fonds personnels (10 mois - condition nécessaire à ce moment-là pour conduire une recherche indépendante), puis sur un programme CRSNG Canada attribué à Pierre Francus (sur le reste du projet). Ce projet à l'INRS visait à reconstituer et comprendre une réponse particulière des lacs face aux transferts de nutriments, dans ce cas l'hypoxie, à grande échelle (une méta-analyse sur 1250 lacs, dont 365 possède des sédiments annuellement laminés, les varves) (Figure 33).

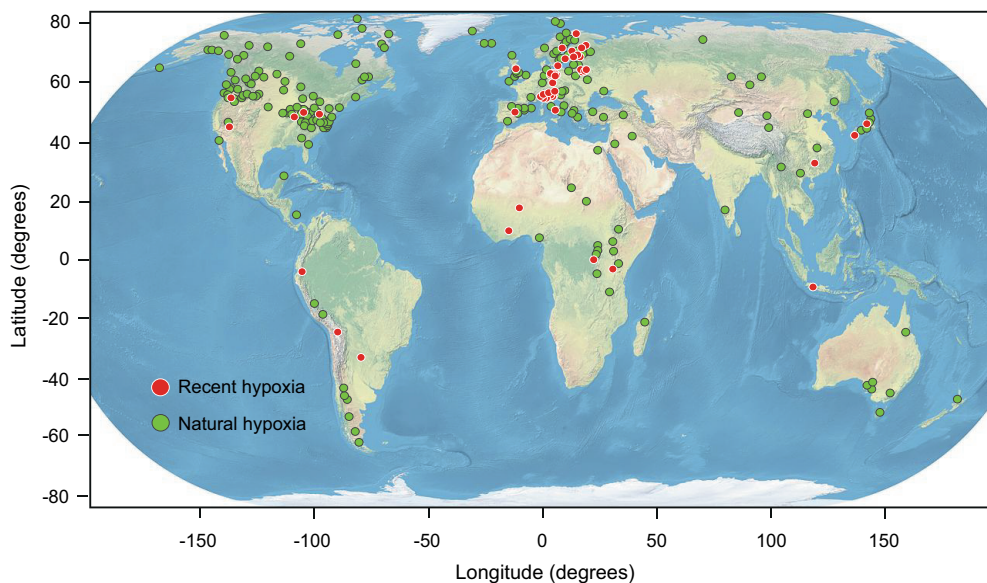


Figure 33. Localisation des 365 sites enregistrant l'hypoxie lacustre dans leurs archives sédimentaires. Les points rouges indiquent les lacs récemment hypoxiques, c'est-à-dire les lacs enregistrant des varves après 1700 (Jenny et al. 2016). Les points verts indiquent les lacs naturellement hypoxiques, c'est-à-dire les lacs présentant des sédiments stratifiés ou varvés depuis au moins les 300 dernières années (Jenny et al. 2016).

Cette méta-analyse indique que les lacs dans le monde ont basculés vers des conditions hypoxiques avant 1900, soit 70 ans avant la mise en place de l'hypoxie anthropique dans les zones côtières. Cette étude montre également que l'augmentation des activités humaines et des rejets de nutriments sont les facteurs qui ont conduit à la mise en place de l'hypoxie (Jenny et al., 2016a)(Figure 34). Aucune corrélation n'a été trouvée avec les changements de précipitations ou de température de l'air. Il n'y a pas d'indication de retour à des conditions lacustres bien oxygénées après perturbation des lacs depuis 1980 dans les pays

industrialisés, malgré la mise en œuvre généralisée de programmes de restauration des lacs. La mise en place de conditions hypoxiques avant 1900 met en évidence les défis liés à l'une augmentation de la demande et des émissions mondiales de nutriments de nos sociétés industrialisées, ainsi que du changement climatique.

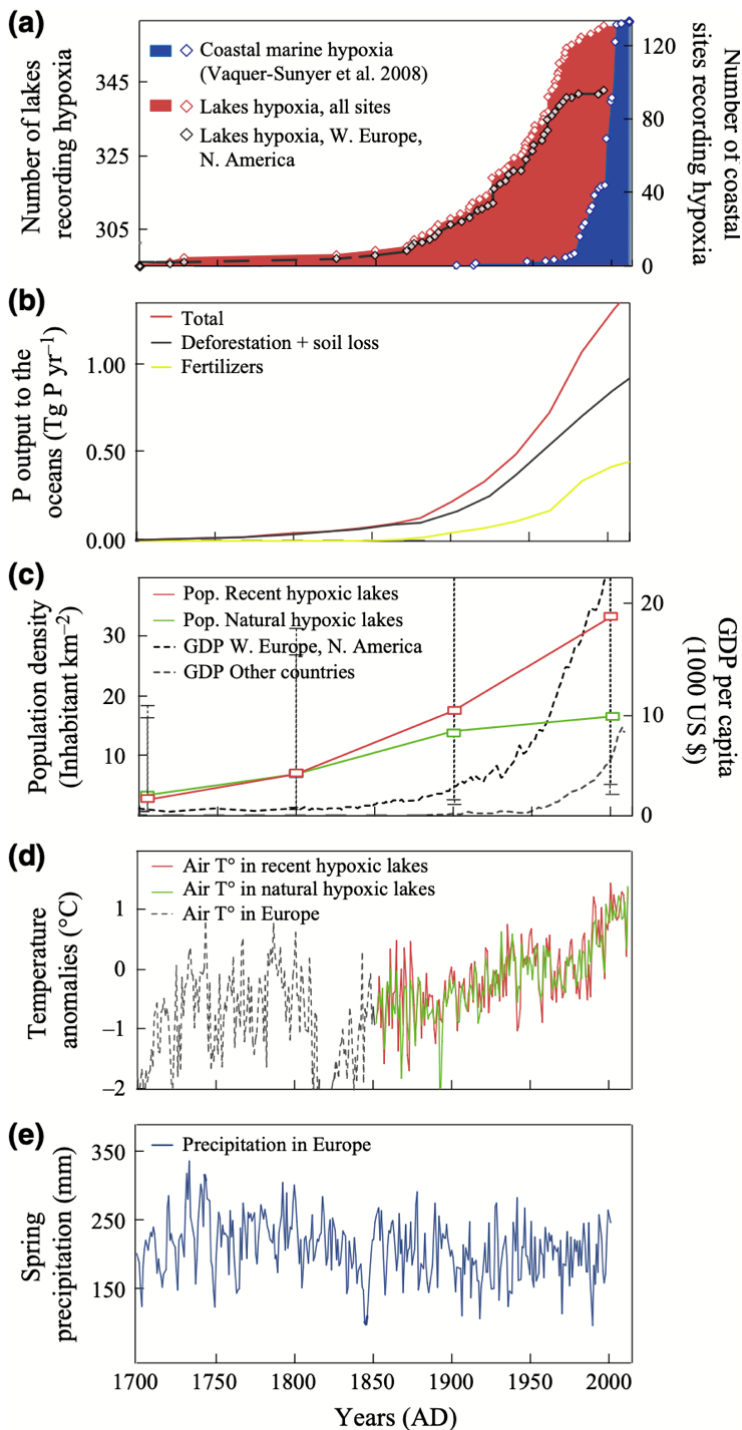


Figure 34. (a) Mise en place de l'hypoxie lacustre et marine au cours des 300 dernières années. (b) Les émissions anthropogéniques de phosphore vers l'océan ont été utilisées comme indicateur des émissions mondiales de P provenant des continents (Filippelli, 2008) : de 1800 à 2000, les émissions totales de P ont augmenté d'un facteur de 5, tandis que les émissions de P provenant des engrais ont augmenté d'un facteur de 7. (c) Évolution de la densité de population humaine locale dans les 365 bassins versants modélisés pour les années 1700, 1800, 1900 et 2000, produit intérieur brut (PIB) annuel moyen pour l'Europe occidentale et l'Amérique du Nord (ligne noire en pointillés) et pour l'Asie, l'Afrique et l'Amérique du Sud (ligne grise en pointillés). (d) L'évolution des anomalies de température de l'air est similaire pour les bassins versants avec une hypoxie récente (en rouge) et naturelle (en vert) de 1850 à 2000. La ligne en pointillés grise montre les anomalies de température issues de la reconstruction des cernes d'arbres avant 1850 (Büntgen et al., 2011). (e) Évolution des précipitations printanières en Europe basée sur la reconstruction des cernes d'arbres (avril-juin) (Büntgen et al., 2011).

En résumé

- A l'échelle globale, les archives paléolimnologiques mettent en évidence la mise en place de l'hypoxie généralisée des eaux des lacs depuis la révolution industrielle.
- La mise en place de l'hypoxie lacustre précède d'environ 70 ans celle de l'hypoxie observée en milieu marin. Cette différence peut être expliquée car les lacs sont plus petits et plus réactifs que les grands systèmes ouverts, mais également car ils sont plus proches des activités humaines et des sources de nutriment.
- Concernant les facteurs de contrôles, les résultats paléolimnologiques ne montrent pas d'effet liés au climat sur la mise en place historique de l'hypoxie.
- La mise en place de l'hypoxie est en revanche concomitante de l'augmentation de la population humaine autour des lacs étudiés ainsi qu'à l'émission de nutriments et d'autres indicateurs de pression humaine, comme le PIB. L'analyse des forçages privilégie ainsi assez clairement la contribution anthropique locale dans la mise en place historique de l'hypoxie des lacs, liée aux apports de nutriments.
- Au moment de l'étude, il n'y a aucune indication d'un retour à des conditions lacustres mieux oxygénées après les années 1980 dans les pays industrialisés, malgré la mise en œuvre de programmes de restauration.
- Le maintien apparent des conditions hypoxiques souligne les défis posés par une demande croissante en nutriments de nos sociétés industrialisées. Des questions nouvelles se précisent : notamment concernant la synergie exercée par la charge interne en nutriment et par le changement climatique.

→ Nouvelle question soulevée par l'étude : si les nutriments semblent la cause principale de la mise en place historique de l'hypoxie des lacs, peut-on préciser de quelles sources de nutriments il s'agit plus spécifiquement ?

14. Hypoxie des lacs européens sous contrôle des sources ponctuelles et diffuses de nutriments

Toujours dans le cadre du postdoctorat à l'INRS, Québec (Qc), Canada, une seconde étude recentrée autour des lacs Européens doit permettre de creuser la question des différentes sources de nutriments impliquées dans la mise en place de l'hypoxie des lacs (Jenny et al., 2016b). *L'objectif de cette étude est d'évaluer si la mise en place historique de l'hypoxie dans les lacs européens est principalement associée à une augmentation des sources ponctuelles de phosphore due à l'urbanisation croissante, ou à l'augmentation des sources diffuses de phosphore liées à l'intensification de l'agriculture, ou au changement climatique.* L'étude combine une synthèse des données paléolimnologiques de l'hypoxie des lacs, de bases de données de couverture/utilisation des terres et de données climatiques au cours des 300 dernières années (Figure 35).

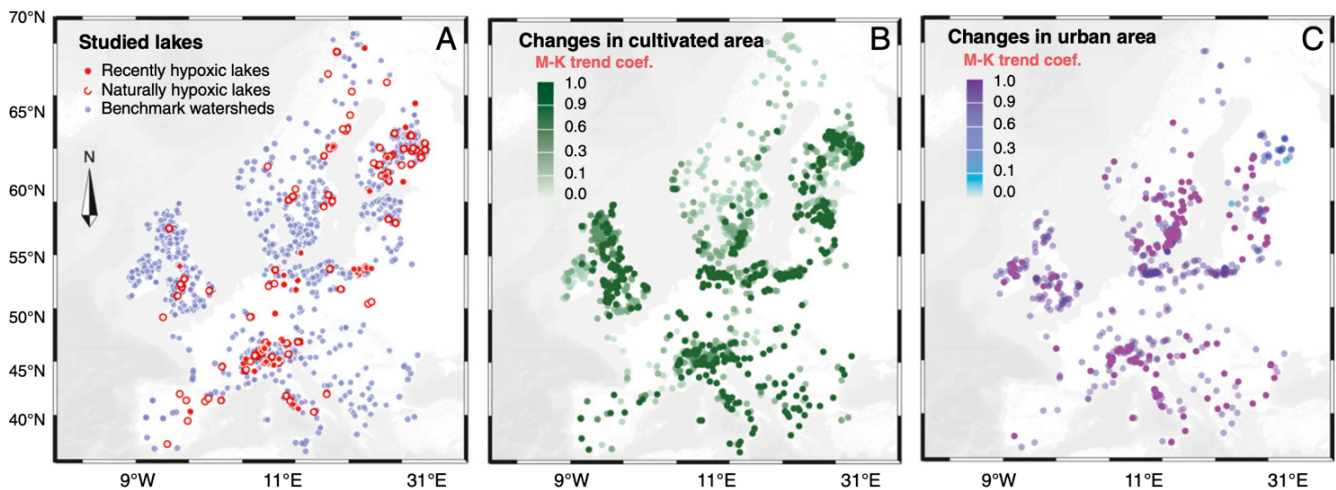


Figure 35. Localisation des 1 607 sites d'étude et évolutions de l'occupation des sols au cours des 300 dernières années (1700–2000 EC). (A) Cinquante et un lacs récemment hypoxiques, 97 lacs naturellement hypoxiques et 1 459 bassins versants de référence composés de 769 lacs issus de la base de données Lake-Core et de 690 lacs européens sélectionnés aléatoirement depuis la base de données GLWD. (B et C) Une augmentation des surfaces cultivées (%) et des zones urbaines (%) au cours des 300 dernières années ont été observées dans tous les bassins versants selon un test M-K, où un coefficient plus élevé indique une augmentation plus marquée (69) (Jenny et al. 2016b).

Contexte - L'augmentation des exports de phosphore (P) vers les rivières et les lacs est un facteur clé de l'expansion de l'hypoxie en eaux profondes dans les lacs au cours de l'Anthropocène. Cependant, l'absence de données instrumentales à long terme complique les analyses qui tentent de lier les changements dans l'utilisation des terres aux réponses aquatiques en aval. Dans cette étude, nous avons synthétisé des données reliant les reconstructions paléolimnologiques de l'oxygénation des eaux profondes des lacs aux changements de couverture et d'utilisation des terres ainsi qu'aux variations climatiques au cours des 300 dernières années. L'objectif était d'évaluer si l'expansion de l'hypoxie dans les lacs européens

était principalement associée à une augmentation des exports de P due à l'urbanisation croissante, à l'intensification de l'agriculture ou aux changements climatiques.

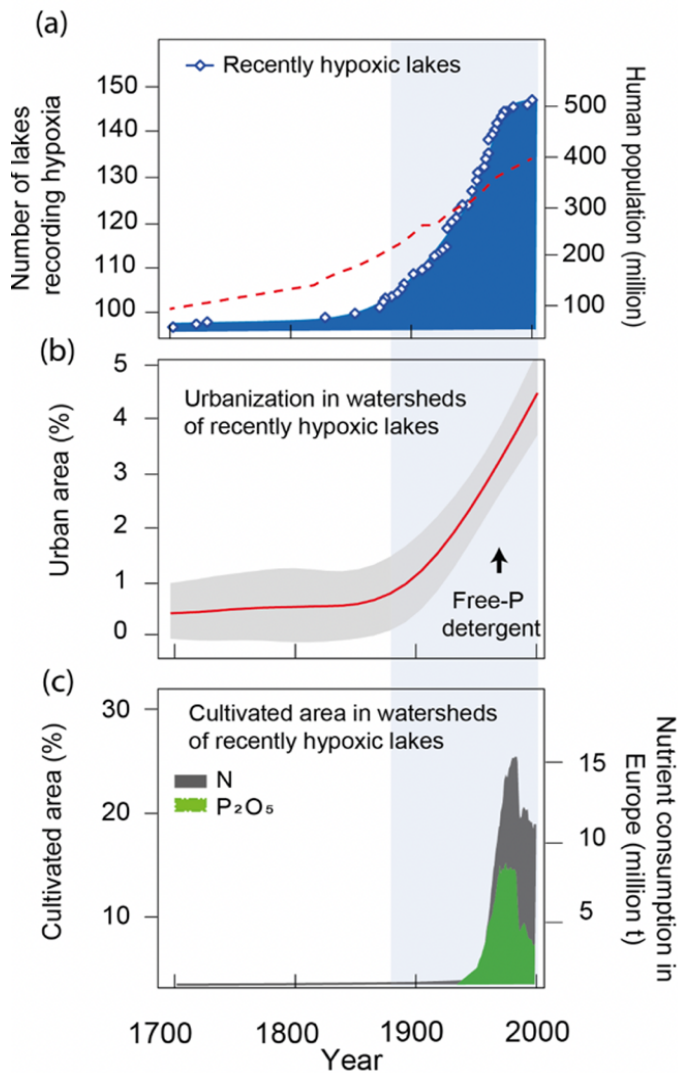


Figure 36. Tendances de la mise en place de l'hypoxie lacustre et de l'urbanisation, ainsi que dynamiques observées des changements climatiques, au cours des 300 dernières années en Europe. (A) Date de mise en place de varves sédimentaire comme marqueur d'apparition de l'hypoxie benthique. Population humaine dans les bassins versants (courbe en pointillés rouges). Pourcentages de zones urbaines (B) dans les bassins versants des 51 lacs ayant basculé vers l'hypoxie. Tendances et les intervalles (95 %) ont été calculés à partir de données d'utilisation des terres par siècle et d'un modèle additif généralisé. La flèche noire dans B indique la mise en place précoce de la législation européenne sur la lutte contre les nutriments dans l'eau dans les années 1970 et 1980 (70). Les pics en gris foncé et en vert dans (C) indiquent les applications respectives d'engrais azotés (N) et de phosphate (P₂O₅) dans l'Union européenne depuis les années 1950 (71).

Nos résultats montrent que l'hypoxie a commencé à se mettre en place dans les lacs européens autour de 1850 et s'est accélérée de manière significative après 1900 (Figure 36). Les changements socioéconomiques en Europe à partir de 1850 ont conduit à une urbanisation généralisée ainsi qu'à une augmentation et une intensification des surfaces cultivées. Cependant, notre analyse des tendances temporelles a démontré que le déclenchement et l'intensification de l'hypoxie lacustre étaient plus fortement liés à l'expansion des zones urbaines qu'aux changements dans les surfaces agricoles et l'application d'engrais. Ces résultats suggèrent que l'hypoxie anthropique dans les lacs européens a été principalement causée par des rejets accrus de P provenant de sources ponctuelles urbaines (Figure 37). À ce jour, il n'y a eu aucun signe de rétablissement durable de l'oxygénation des eaux profondes dans les lacs malgré la mise en œuvre de la législation européenne sur l'eau dans les années 1970 à 1980 et la diminution ultérieure de la consommation domestique de P.

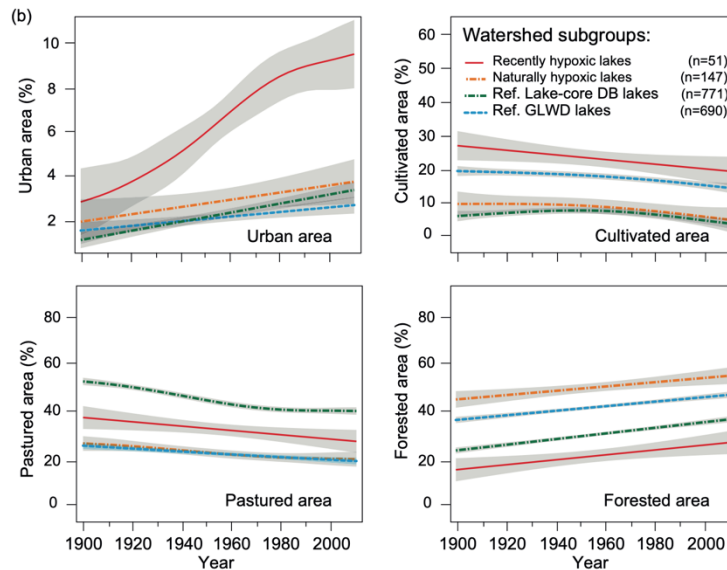
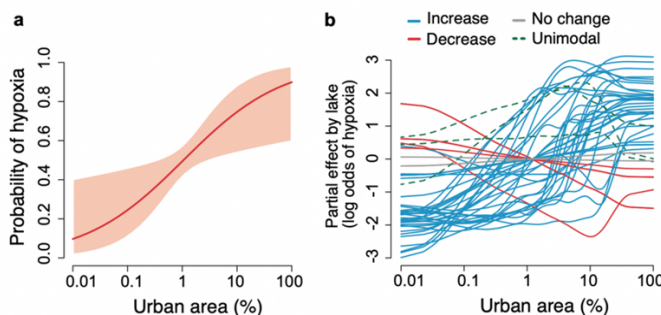


Figure 37. Tendances centennales d'occupation des sols en Europe basées autour de lacs perturbés (apparition de l'hypoxie) et autour de lacs de référence. Les tendances en Europe représentent les pourcentages décennaux des zones urbaines, cultivées, de prairies et de forêts. Notez l'augmentation plus élevée de l'urbanisation pour les sites récemment hypoxiques au cours des 110 dernières années par rapport aux sites de référence. Les bandes grises indiquent les intervalles de confiance à 95 % basées sur l'AMM.

En utilisant les modèles additifs mixtes généralisés (GAMM), nous avons constaté que la probabilité d'apparition de l'hypoxie dans un sous-ensemble de 51 lacs augmentait avec la proportion croissante de zones urbaines au cours des 300 dernières années ($p < 0,0001$), mais n'était pas liée aux changements dans les surfaces cultivées et les pâturages ($p > 0,1$) ($R^2 = 0,23$) (Figures 37, 38). En revanche, nous n'observons pas d'augmentation aussi marquée de l'urbanisation dans des sites contrôle sans présence avérée de mise en place de l'hypoxie (Figure 37). Une observation courante dans les lacs où l'hypoxie s'est développée récemment est l'accélération de l'urbanisation autour de 1900, qui a coïncidé avec le début de l'hypoxie. Cependant, le moment de l'apparition de l'hypoxie variait considérablement d'un lac à l'autre.



Random slope logistic GAMM	edf	Ref.df	Chi.sq	p-value	Signif.
s(Urban area)	34.0	46.0	118.6	6.3e-14	***
s(Cultivated area)	1.9	2.3	3.5	0.24	
s(Pastured area)	3.3	4.1	5.2	0.27	

Figure 38. Le modèle logistique GAMM indique que la probabilité d'apparition de l'hypoxie dans les lacs augmentait à mesure que la proportion de la zone urbaine augmentait au cours des 300 dernières années. (B) Un GAMM logistique lisse aléatoire a en outre détecté que la grande majorité des lacs ont connu une augmentation

de la probabilité d'hypoxie à mesure que la couverture terrestre urbaine augmentait, mais que le moment de l'apparition variait d'un lac à l'autre.

Ce qu'il faut retenir

- A l'échelle Européenne, les résultats de l'étude paléolimnologique confirment que la mise en place historique de l'hypoxie des lacs 1) était inédite à l'échelle des derniers millénaires, 2) semblait irréversible jusqu'à aujourd'hui, 2) était généralisée : 20% des lacs au moins (seuil minimum) ont vu leurs couches d'eau profonde perdre en oxygène.
- Les résultats tendent à indiquer que la mise en place historique de l'hypoxie a été causé en Europe par l'augmentation des apports de phosphore ponctuels à partir des années 1900 (avec une forte augmentation dans les années 1950), qui ont accru la productivité biologique lacustre.
- Si les archives sédimentaires indiquent que l'extension de l'hypoxie des lacs en Europe s'est produite bien avant l'utilisation générale des engrais commerciaux au milieu du XXe siècle, l'étude ne remet pas en cause le fait que les apports diffus seraient un contributeur fort aujourd'hui dans le maintien de l'hypoxie.
- Cette étude permet d'illustrer les conséquences des pratiques anthropiques sur le temps long pour comprendre la réponse des systèmes lacustres, et illustre parfaitement la notion 'd'héritage' dont il faut tenir compte dans les réflexions intégrées et à long terme de gestion.

➔ Nouvelle question soulevée par l'étude : Est-ce que les conclusions apportées par les études paléoenvironnementales corroborent les observations issues des suivis limnologiques ?

15. Réconcilier les observations limnologiques et paléolimnologiques

En 2020 j'ai contribué à une étude pionnière sur l'analyse mondiale des conditions d'oxygène lacustre à partir de suivis instrumentaux sur 40 ans (Jane et al., 2021), issue du réseau GLEON, dont fait partie l'observatoire OLA. Dans cette étude, l'analyse de 393 lacs (et 45 148 profils d'oxygène dissous et de température) met en évidence une diminution généralisée de l'oxygène dessous de l'hypolimnion due à l'intensification de la stratification thermique et à la diminution de la transparence de l'eau. Cette observation de la diminution de l'oxygène des lacs concorde avec les approches globale de paléolimnologie (Jenny et al., 2016a), en revanche les facteurs de contrôle identifié diffèrent (Figure 39).

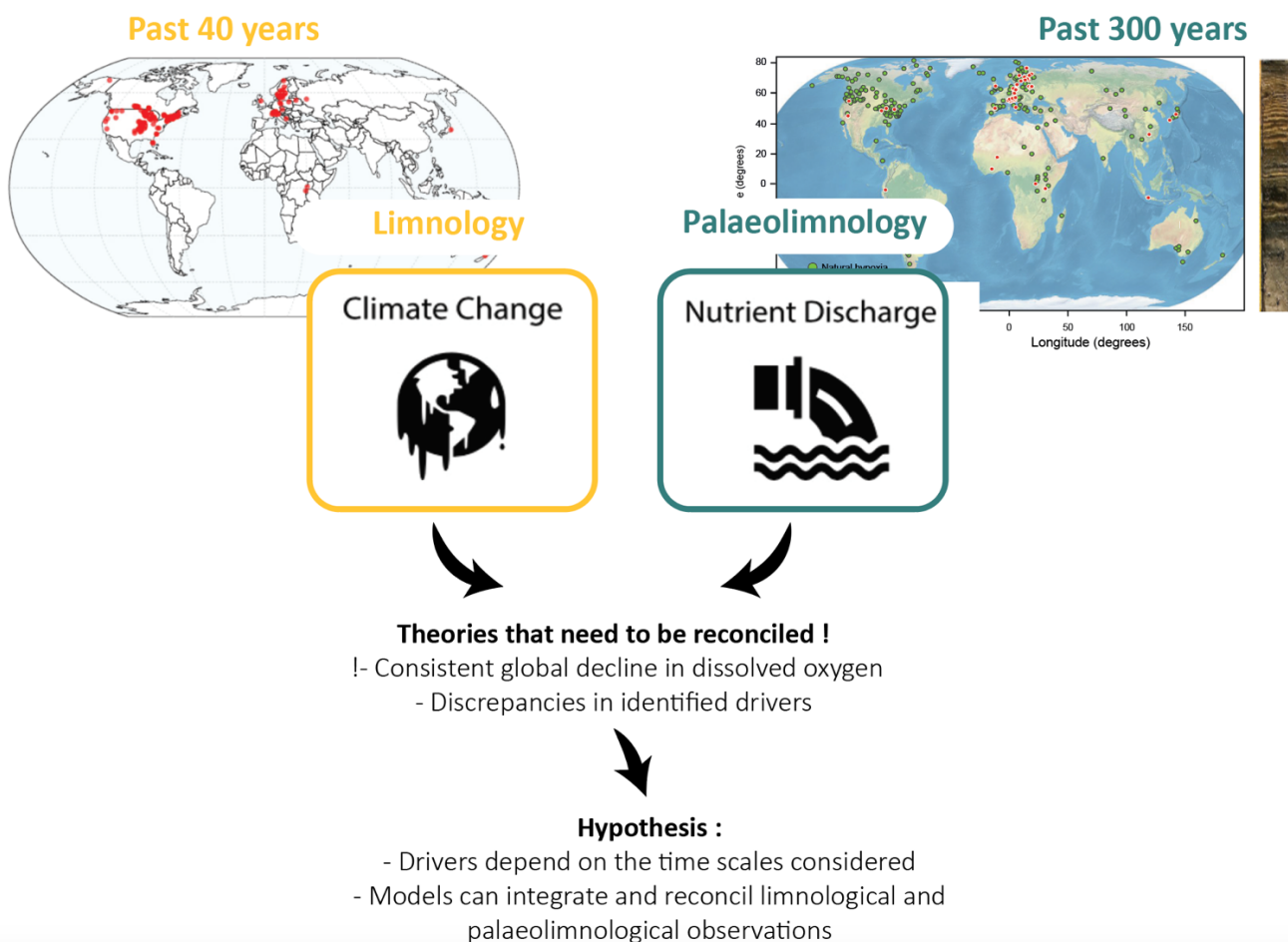


Figure 39. Réconcilier par l'intégration et la modélisation – Il est concevable que le niveau d'expression des forçages dépende des échelles de temps considérées. Pour réconcilier les observations issues de la limnologie et de la paléolimnologie il serait pertinent de recourir à l'intégration des échelles de temps par la modélisation. La modélisation mécaniste pourrait introduire des processus clés régissant les effets en cascade du climat et des apports en nutriments sur le fonctionnement général des lacs, permettant ainsi d'identifier les mécanismes et les interactions entre les forçages responsables de la diminution de l'oxygène dissous dans les lacs. De plus, la modélisation permettrait d'explorer les impacts potentiels du changement climatique à venir sur le régime thermique et les conséquences sur les conditions d'oxygène.

Section 2.4 – Réchauffement climatique et effets sur le cycle du carbone lacustre au XXI^e siècle

Dans le cadre de mes projets avec les gestionnaires des lacs et du pôle ECLA (OFB) une approche de modélisation a été développée pour étudier les effets du réchauffement climatique sur le comportement thermique des lacs qui importe pour le fonctionnement des lacs, l'oxygène dissous et le cycle du carbone (Desgué-Itier et al., 2023). Dans cette étude, les effets du changement climatique sur le régime thermique et la solubilité de l'oxygène ont été analysés dans les quatre plus grands lacs péri-alpins français sur la période 1850–2100. Nous avons testé la robustesse de plusieurs modèles thermiques de lacs unidimensionnels (1D) pour les variations à long terme en nous basant sur jusqu'à 63 ans de données limnologiques collectées par l'Observatoire Français des Lacs (OLA). L'innovation dans cette étude réside dans une adaptation de l'approche pour les études de long-terme : nous avons en l'occurrence évalué la possibilité de forcer les modèles mécanistes en suivant l'évolution à long terme du rayonnement à onde courte et de la température de l'air tout en fournissant des tendances saisonnières réalistes pour les autres variables, pour lesquelles le downscaling à l'échelle locale et les simulations sur le temps long manquent souvent de précision.

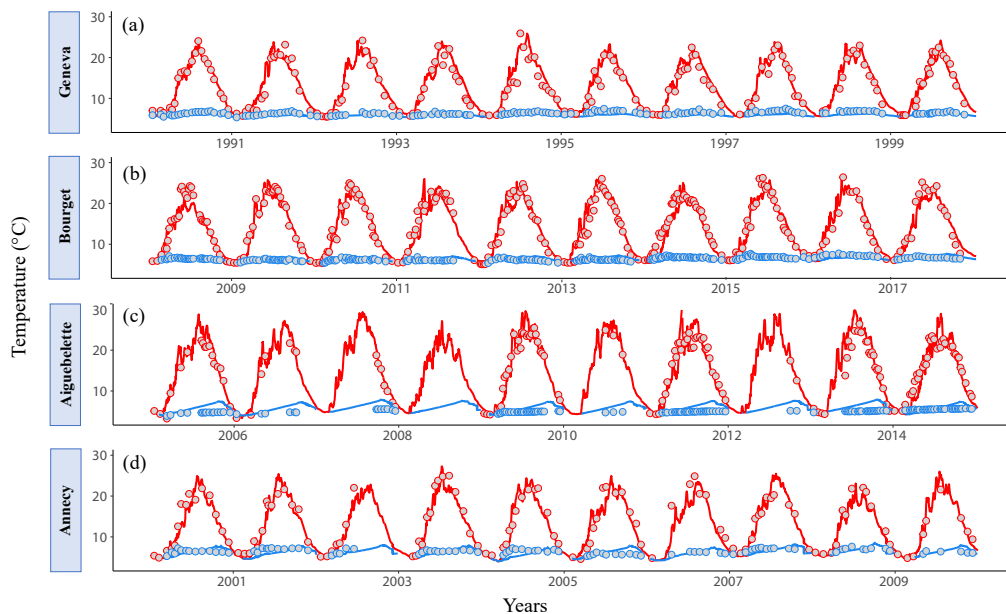


Figure 40. Variations temporelles des températures de l'épilimnion (rouge) et de l'hypolimnion (bleu) des lacs Léman (a), Bourget (b), Annecy (c) et Aiguebelette (d). Simulations MyLake (ligne) vs Observations (point) sur la période de validation de 10 ans (Desgué-Itier et al., 2023)..

Les effets à long terme du changement climatique sur les lacs à l'échelle mondiale incluront une modification substantielle du régime thermique et de la solubilité de l'oxygène, entraînant des altérations des processus écosystémiques, des habitats, et des concentrations de substances essentielles. Des efforts récents ont permis de développer des projections à long terme des effets du changement climatique sur les régimes thermiques des lacs et la solubilité de l'oxygène. Cependant, **les projections sont rarement**

confrontées à des observations couvrant plusieurs décennies et les modèles manquent encore de validation pour les tendances de long-terme.

16. Impacts du CC sur le régime thermique des lacs stratifiés (1850-2100)

Les résultats indiquent qu'il est possible de réduire à uniquement deux variables de forçage le modèle lacustre, en l'occurrence les T° de l'air et le rayonnement solaire à ondes courtes. En utilisant cette approche, le modèle MyLake, forcé par les températures de l'air et le rayonnement à ondes courtes, a précisément prédit les variations du régime thermique des lacs au cours des 4 à 6 dernières décennies, avec un RMSE inférieur à $1,95\text{ }^\circ\text{C}$ (Figure 40). Au cours des 30 dernières années, les températures de l'eau ont augmenté de $0,46\text{ }^\circ\text{C}$ par décennie dans l'épilimnion et de $0,33\text{ }^\circ\text{C}$ par décennie dans l'hypolimnion. Simultanément, la solubilité de l'oxygène a diminué de $0,104\text{ mg/L}$ par décennie dans l'épilimnion et de $0,096\text{ mg/L}$ par décennie dans l'hypolimnion. Selon le scénario SSP370 du GIEC, les lacs péri-alpins pourraient connaître une augmentation de $3,80\text{ }^\circ\text{C}$ dans les 70 prochaines années (Figure 41), accompagnée d'une baisse de $1,0\text{ mg/L}$ de la solubilité de l'oxygène.

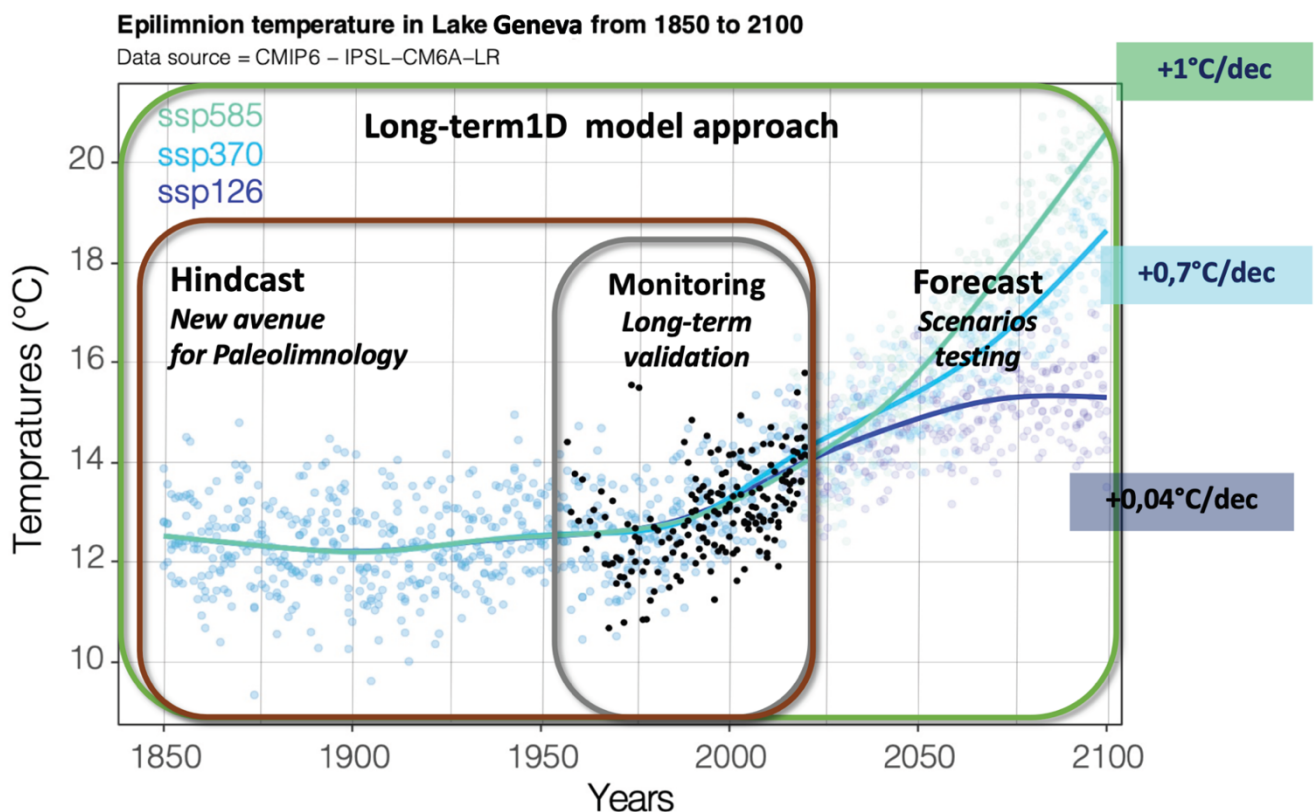


Figure 41. Trois dimensions temporelles de notre approche, ici pour caractériser l'évolution de la température des eaux de surface : 1) rétro-observations, 2) observations et 3) scénarios futurs. La modélisation permet de lier ces trois échelles temporelles. Les points noirs représentent moyennes annuelles de température issues des observations de suivis. Les points colorés représentent les simulations du modèle 1d GLM et les scénarios (SSP585, SSP370, SSP126).

17. Impacts du CC sur les indicateurs de métabolisme lacustre : l'oxygène dissous et le carbone (1850-2100)

Dans le cadre du postdoctorat de L. Soares, une étude financée par la CIPEL et le pôle ECLA pour simuler les conditions d'oxygénation du lac Léman suivant une nouvelle approche d'assimilation (c.f. section méthode) (Soares et al. L&O Letters, accepté). Ces dernières années, la diminution des conditions d'oxygénation des lacs à l'échelle mondiale a été observée (section 2.4). Cependant, la compréhension des facteurs qui en sont à l'origine reste insuffisante. Nous avons développé une approche d'assimilation des données paléo-modèles (section 2.2) pour étudier les variations à long terme des conditions en oxygène dissous dans le lac Léman sur la période 1850-2100 (Figure 42). Cette méthode permet d'estimer pour la première fois les conditions de référence en oxygène et de quantifier la durée et l'intensité de l'hypoxie depuis la période pré-perturbation.

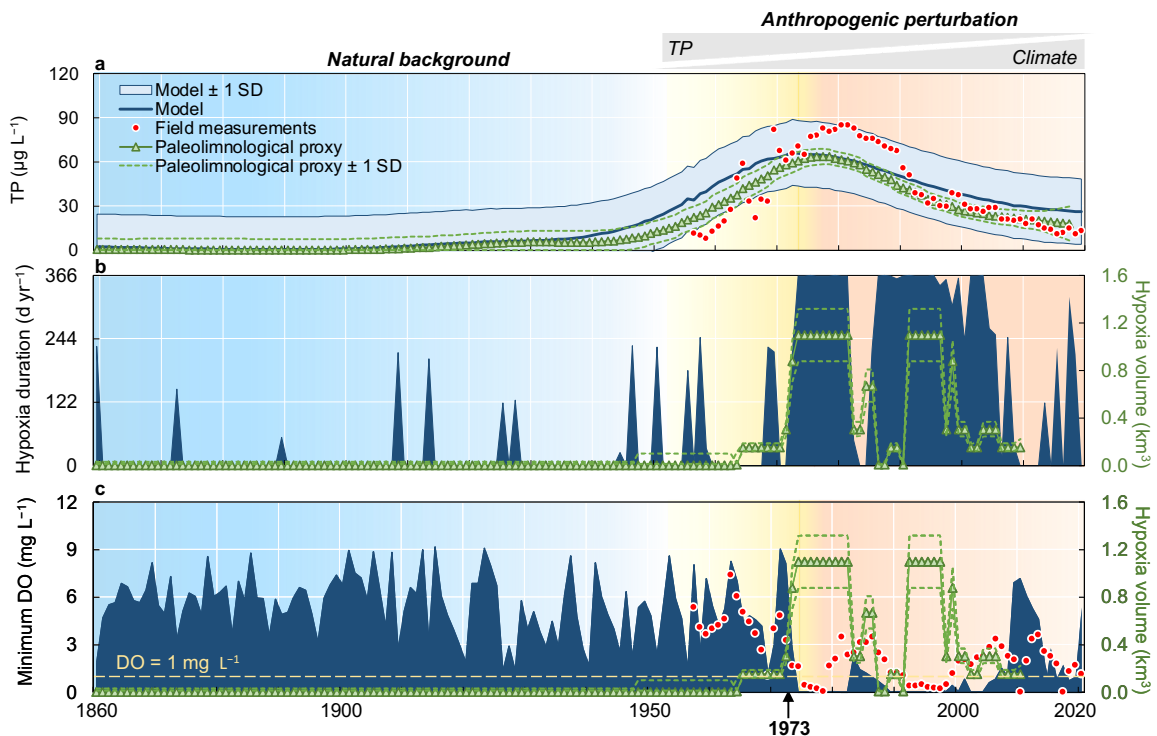


Figure 42. Modélisation des valeurs annuelles dans la colonne d'eau a) du phosphore total, b) de la durée de l'hypoxie, et c) de la concentration minimale en oxygène intégrée sur toute la colonne d'eau sur la période historique (1860–2020). La durée de l'hypoxie représente le nombre de jours dans l'année avec une concentration minimale d'oxygène inférieure à 1 mg L^{-1} . Les mesures sur le terrain du TP représentent la concentration médiane annuelle, et les mesures sur le terrain de l'oxygène dissous représentent la valeur minimale, toutes deux dans toute la colonne d'eau. Le fond coloré indique une transition d'une condition bien oxygénée (normoxie) à l'établissement de l'hypoxie dans le lac profond. Le proxy paléolimnologique utilise pour reconstituer le volume d'eau hypoxique (b et c) correspond à l'axe des y de droite (Soares et al. L&O Letters, accepté).

Les simulations fournissent de nouvelles informations sur les conditions de référence de l'oxygène, informant quant à la plage de variabilité naturelle inhérente avant la période de monitoring (c.-à-d. 15 ± 15

jours par an d'hypoxie et $5,5 \pm 2,0$ mg L⁻¹ d'OD minimum dans toute la colonne d'eau), ce que le proxy paléolimnologique en permettait pas de documenter quantitativement. La dynamique de l'hypoxie reconstituée indique que le lac Léman était bien oxygéné avant la seconde moitié du 20^e siècle, ne présentant que des événements d'hypoxie épisodiques de courte durée, c'est-à-dire ne dépassant pas un an. Le lac a montré une résilience à l'établissement de l'hypoxie jusqu'aux années 1970. Un signal précoce de changement de la dynamique de l'oxygène est fourni par le proxy paléolimnologique dans les années 1960. Ce n'est qu'en 1973, lorsque le TP médian atteint 67 µg·L⁻¹, qu'au lieu d'une tendance continue et régulière suivant l'enrichissement en nutriments, le régime d'hypoxie a connu un changement brutal de durée et d'ampleur sans précédent au cours des 112 années précédentes (1860–1972).

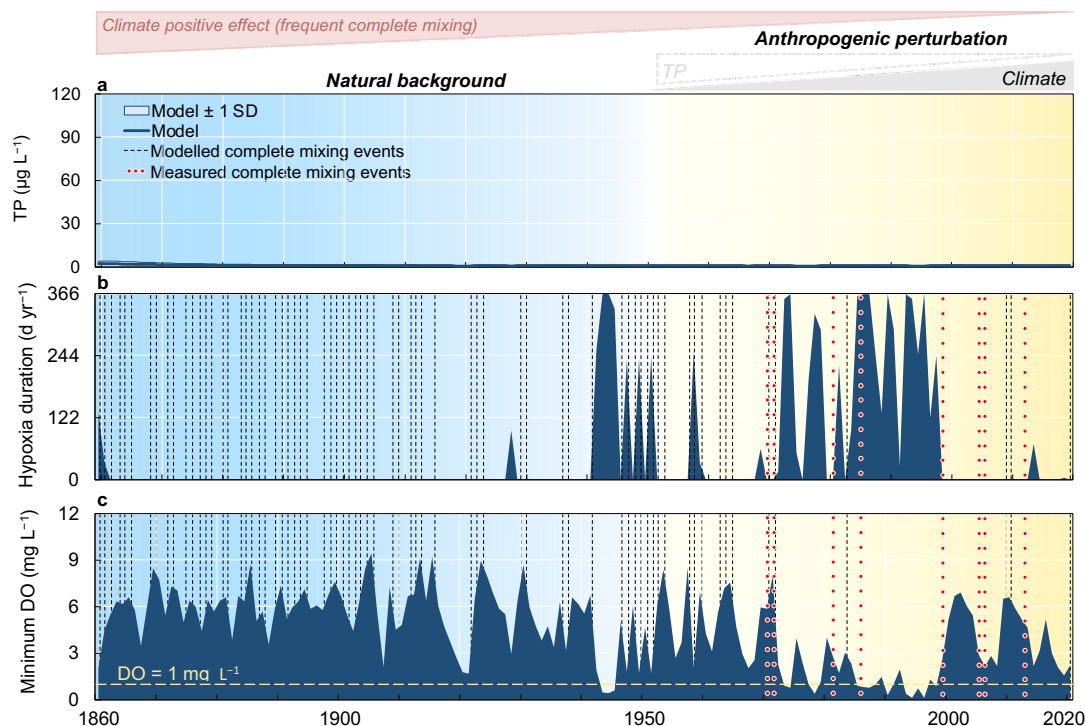


Figure 43. Simulation exclusivement de l'effet climatique (zone bleu foncé) sur l'intensité et la durée de l'hypoxie dans le lac Léman : a) la médiane du phosphore total, b) la durée de l'hypoxie, et c) la concentration minimale en oxygène dans toute la colonne d'eau sur la période historique (1860–2020). La durée de l'hypoxie représente le nombre de jours dans l'année avec une concentration minimale d'oxygène inférieure à 1 mg L⁻¹. Le mélange complet hivernal modélisé (lignes pointillées noires) est défini comme l'événement où la différence de température et de concentration en oxygène est inférieure à 2 °C et 2 mg L⁻¹, respectivement, entre la surface et le fond du lac. Les cercles rouges indiquent le mélange complet hivernal à partir des données d'observation. Le fond coloré indique une transition d'une condition bien oxygénée à l'établissement de l'hypoxie dans le lac profond.

La modélisation permet également de quantifier la perturbation anthropique de certains processus. Au cours des XIX^e et XX^e siècles, une augmentation des taux de consommation d'oxygène (de 0,3 à 2,2 g O₂ m⁻² j⁻¹) suite à un enrichissement excessif en nutriments a déclenché l'apparition de l'hypoxie, dont l'intensité et la durée ont été influencées par la combinaison des forces climatiques et des concentrations élevées en phosphore. À l'avenir, l'hypoxie sera principalement perturbée par la réduction de la fréquence des événements de brassage complet (Figure 43).

Les simulations des conditions avant l'eutrophisation (pré-perturbation anthropique) et les scénarios climatiques futurs ont permis de définir un espace opérationnel de conditions environnementales qui évite les conditions hypoxiques (Figure 44). Nos résultats mettent en évidence qu'un brassage hivernal complet accompagné d'une recharge en oxygène tous les trois ans suffisent à compenser la demande en oxygène dans le lac Léman, même lorsque cette demande est élevée et dépasse $1,5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Cependant, si le brassage hivernal complet devient moins fréquent, des taux de consommation d'oxygène similaires à ceux observés avant l'eutrophisation peuvent entraîner une hypoxie persistante, représentant une menace importante pour la survie de la vie aquatique dans l'hypolimnion.

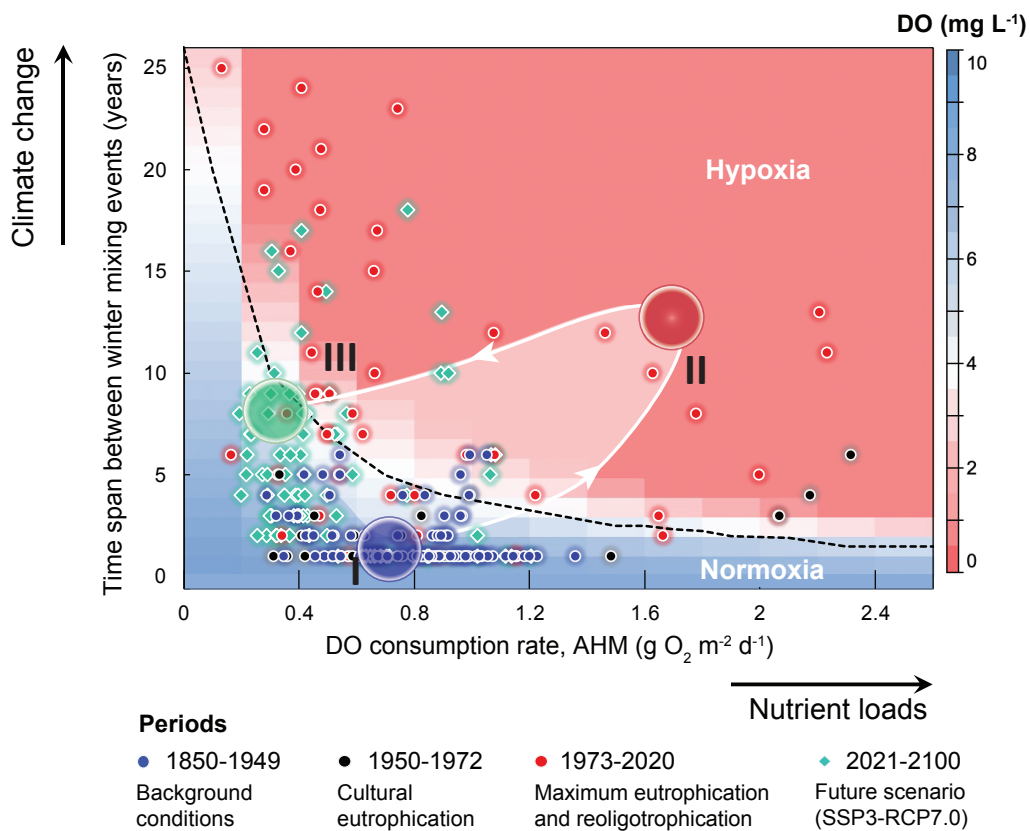


Figure 44. Représentation de l'espace de fonctionnement sûr pour les conditions annuelles en oxygène dans le fond du lac face au réchauffement climatique et aux apports de nutriments. Les conditions d'oxygène dépendent de l'interaction entre les occurrences de mélange hivernal (axe des y) et le taux de minéralisation hypolimnétique (AHM, axe des x). Le fond coloré représente les concentrations théoriques en oxygène dissous (DO) dans l'espace de fonctionnement. Les prospectives 2021–2100 sont représentés pour le scénario intermédiaire d'émission de GES (SSP3-RCP7.0) en prenant le TP dans le lac à sa valeur actuelle modélisée ($26 \mu\text{g L}^{-1}$). La ligne en pointillés noirs représente le seuil entre les conditions bien oxygénées et les conditions mal oxygénées, définissant ainsi un espace de fonctionnement sûr pour les conditions du fond.

18. *Prospective des effets du CC : Tendances et défis à venir concernant les services rendus*

Cette étude profite des développements méthodologiques (sections 17 et 18) pour tendre vers des études opérationnelles. Cette étude propose l'utilisation du modèle lacustre 1D couplé GLM-AED et a recouru aux différents scénarios climatiques existants, issus des modèles globaux (IPCC – CMIP6) pour anticiper l'évolution d'indicateurs généraux de la qualité du lac d'Annecy (Figure 45) (Soares et al. 2024). Les données de suivis limnologiques de OLA (réalisés par le CARTEL depuis 1966) ont permis de calibrer et valider le modèle.

Afin de donner une image des évolutions probables du lac au cours des prochaines décennies, cette étude propose une analyse des dynamiques temporelles de 101 métriques dérivées de sept variables fondamentales : la température, l'atténuation de la lumière dans l'eau, les concentrations en oxygène, phosphore, chlorophylle-a, nitrates et carbone organique. Les métriques ont été calculées dans les couches de surface et les couches profondes du lac afin de prospecter les évolutions des processus hydrodynamiques et des cycles biogéochimiques de la zone pélagique à l'horizon 2100. Les niveaux de confiance de ces simulations ont été estimés et discutés.

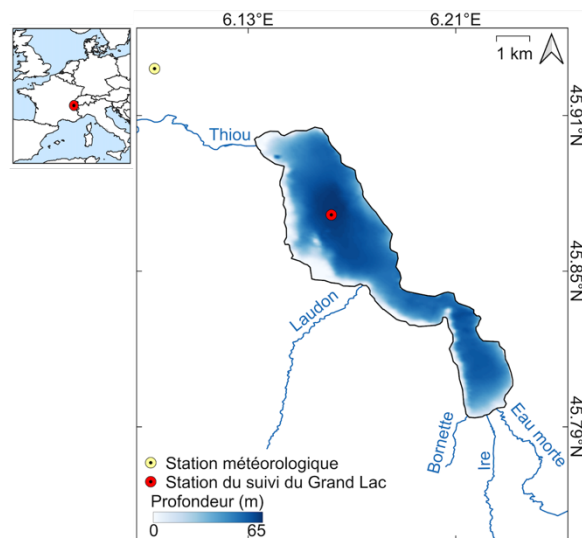


Figure 45. *Lac d'Annecy et la station de mesure du Grand Lac.*

Différents indicateurs écologiques, développés dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (2000), ont été estimés pour caractériser la qualité biologique du lac (Tableau 5). Les 101 métriques ont été classées par catégories afin d'estimer les effets du changement climatique sur quelques services écosystémiques clés rendus par le lac : 1) l'approvisionnement en eau potable ; 2) la pêche des poissons nobles exploités ; 3) les attraits esthétiques et culturels ; 4) la régulation des cycles géochimiques et le soutien à la séquestration du carbone ; 5) le soutien au maintien de l'état écologique général du lac. Cette étude n'aborde pas la question des pollutions telles que les éléments traces métalliques, les micropolluants organiques, les résidus médicamenteux, les hormones, les microplastiques, ou encore les nanoparticules qui nécessiteraient des études spécifiques.

Tableau 5. Valeurs pour les différentes classes de qualité d'après le Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (MEEM, 2016) et des l'EQR sur les métriques qui caractérisent les services écosystémiques rendus par le Lac d'Annecy (Soares et al. 2024).

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Approvisionnement de l'eau potable ^a					
Durée nitrate < 50,0 mg L ⁻¹ (j an ⁻¹) ^b	365	292	219	146	73
Oxygène dissous moyen (mg L ⁻¹) ^b	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
Durée oxygène > 5,0 mg L ⁻¹ (j an ⁻¹)	365	292	219	146	73
Distance du pic de chl-a (m) à la prise d'eau actuelle (30 m)	23,0	20,0	16,0	10,0	3,0
Distance du pic de chl-a (m) à la prise d'eau projetée (40 m)	33,0	26,0	20,0	13,0	7,0
Peuplement salmonicole					
Oxygène > 7,0 mg L ⁻¹ (% vol.) ^c	100	80	60	40	20
Durée oxygène > 9,0 mg L ⁻¹ (j an ⁻¹) ^c	365	292	219	146	73
Durée ammonium < 0,04 mg L ⁻¹ (j an ⁻¹) ^c	365	292	219	146	73
Durée ammonium < 1,0 mg L ⁻¹ (j an ⁻¹) ^c	365	292	219	146	73
<i>Coregonus lavaretus</i> : température tolérée (% vol.)	100	80	60	40	20
<i>Salvelinus alpinus</i> : température tolérée (% vol.)	100	80	60	40	20
Saturation de l'oxygène > 65 % (% vol.)	100	80	60	40	20
Profondeur de la température optimum (m)	13,7	15,2	17,1	19,6	22,8
Profondeur de la température de tolérance (m)	10,7	11,9	13,4	15,3	17,8
Régulation des cycles géochimiques et séquestration du carbone					
Carbone organique total au fond du lac (mg L ⁻¹)	1,15	0,92	0,69	0,46	0,23
Soutien pour le maintien de l'état écologique général du lac					
Température dans les couches de surface (°C)	11,5	12,8	14,4	16,4	19,2
Température du métalimnion (°C)	7,2	8,0	9,0	10,3	12,0
Profondeur de la thermocline (m)	20	22	25	29	33
Stabilité de la colonne d'eau (J m ⁻²)	1483	1648	1854	2119	2472
Date de début de la stratification	105	115	125	135	145
Date de la fin de la stratification	362	10	20	30	40
Durée de la stratification (j an ⁻¹)	256	266	276	286	296
Profondeur maximale du brassage des eaux (m)	65	52	39	26	13
Date de la profondeur maximale du brassage des eaux	10	20	30	40	50
Oxygène dissous dans les couches de surface (mg L ⁻¹)	11,0	8,8	6,6	4,4	2,2
Chlorophylle-a (µg L ⁻¹)	1,7	2,1	2,8	4,2	8,5
Indice d'état trophique	37	40	50	60	70
Phosphore total dans les couches de surface (µg L ⁻¹) ^d	13,6	19,4	27,5	39,1	> 39,1
Nitrate dans les couches de surface (mg L ⁻¹) ^d	1,2	2,6	5,6	30,1	> 30,1
Ammonium dans les couches de surface (µg L ⁻¹) ^d	86,1	116,8	154,1	203,0	> 203,0

a Métriques calculées à la prise d'eau potable actuelle (30 m) et projetée (40 m).

b Directive (UE) n° 2020/2184 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

c Directive (UE) n° 2006/44 concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons.

d Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (2016).

Dans le but d'ajuster la démarche d'évaluation de l'évolution de la qualité écologique du lac d'Annecy au contexte de la DCE, une démarche basée sur les Ratios de Qualité Écologique, dénommé « EQR » pour Ecological quality ratio, selon la terminologie DCE (Van and Solimini, 2007) a été entreprise définissant des classes de qualité correspondant au rapport entre un état observé et la condition caractéristique d'un bon état écologique considéré comme référentiel. Le ratio EQR exprime donc un écart à la référence, définissant les valeurs des limites de classes (Très bon, Bon, Moyen, Médiocre, Mauvais) sur une période donnée. Cette méthode a été appliquée aux différentes métriques calculées, afin d'évaluer les évolutions et effets du changement climatique sur les services écosystémiques rendus par le lac. Le référentiel, ou valeurs de références, correspond dans ce rapport au seuil des normes de qualité des eaux issues du guide ministériel technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux,

plans d'eau) (MEEM, 2016) (détaillées plus bas). Dans le cas d'absence de valeur de référence documenté dans le guide technique (MEEM 2016) nous avons alors calculé arbitrairement les référentiels en se basant sur les valeurs moyennes observés sur la période 1968–1998. Nos résultats indiquent que dans des conditions où les pollutions au lac n'augmenteraient pas par rapport aux niveaux actuels les services d'approvisionnement en eau potable ne devraient pas être impactés négativement par les évolutions du climat (Figure 46).

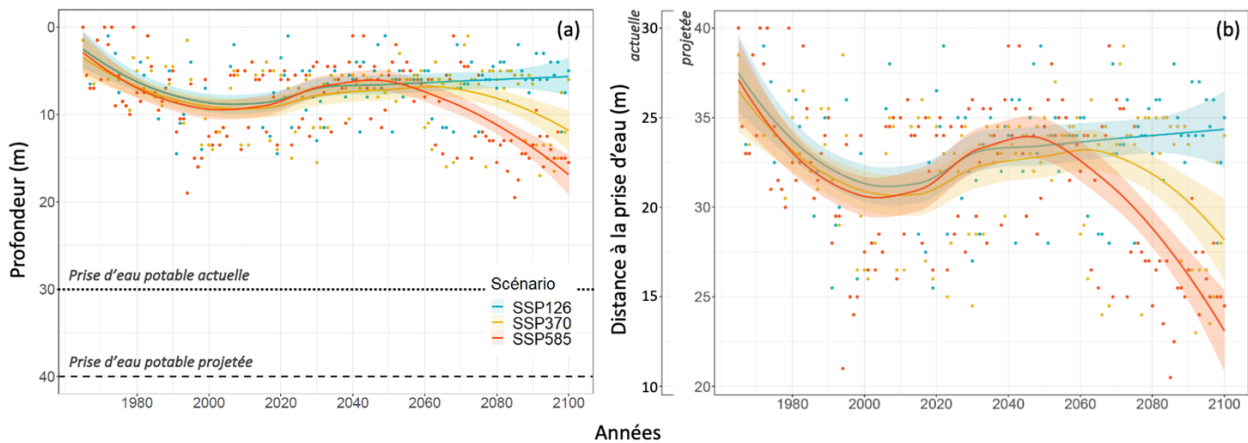


Figure 46. Profondeur maximale annuelle du pic de chlorophylle a (a) et distance à la prise d'eau potable (b) sur la période 1968–2100, en fonction des 3 scénarios (SSP1-RCP2.6, SSP3-RCP7.0 & SSP5-RCP8.5) dans le lac d'Annecy (Soares et al. 2024)

La thermocline, profondeur où l'on retrouve le plus grand gradient de température, a connu un approfondissement significatif entre les années 1968 et 2000 d'environ 4 mètres (Figure 47).

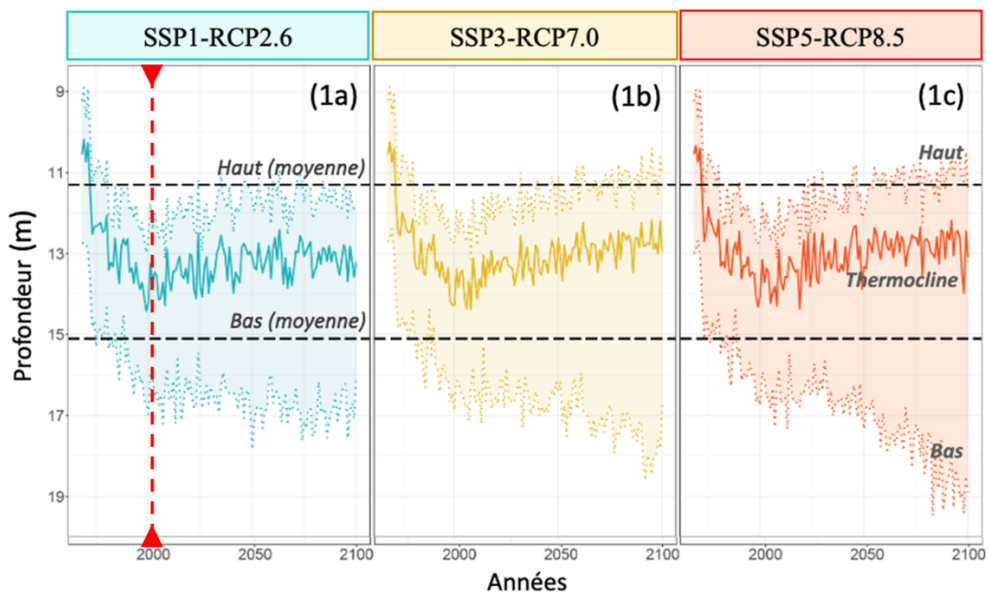


Figure 47. Description de l'évolution de la thermocline et du métalimnion en été (de juin à octobre) sur la période 1968–2100 : profondeurs moyennes annuelles (haut = limite inférieure de l'épilimnion ; bas = limite supérieure de l'hypolimnion) de juin à octobre selon les 3 scénarios SSP1-RCP2.6 (a), SSP3-RCP7.0 (b) et SSP5-RCP8.5 (c), sur la période 1968–2100, dans le lac d'Annecy. L'approfondissement de la thermocline a déjà eu lieu.

Conditions de reproduction

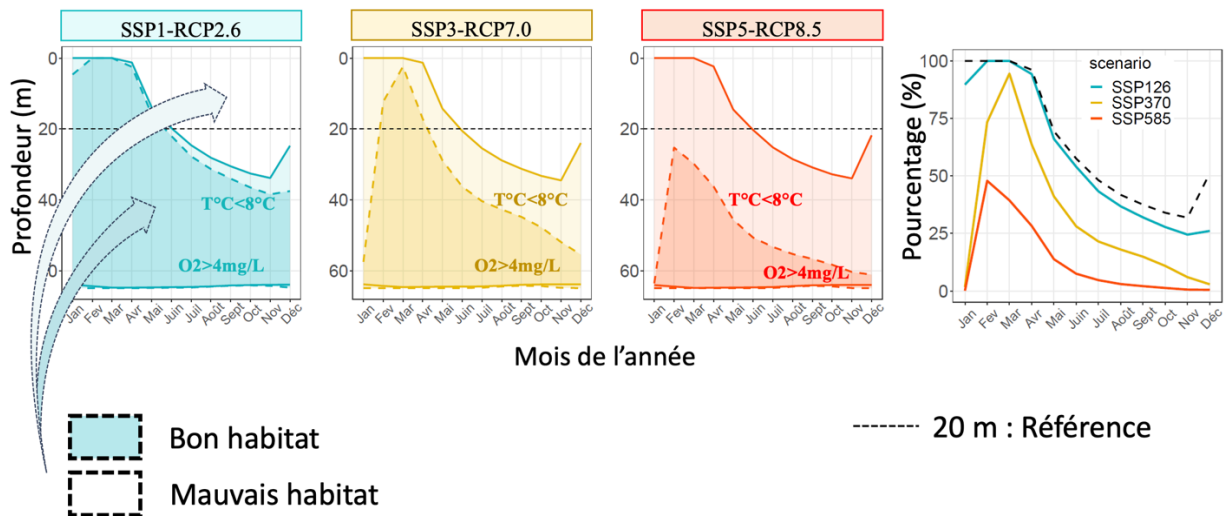


Figure 48. Volumes d'eau de qualité optimale pour la reproduction (thermie et oxygène) des salmonidés par rapport au volume total du lac, au cours de l'année pour les 3 scénarios futurs et sur la période 2010–2020 (ligne pleine) en considérant uniquement le seuil optimal de température ($T < 8^{\circ}\text{C}$). Les températures optimales disparaissent dans le cas du scénario le plus pessimiste (Soares et al. 2024).

Les métriques renseignent sur les tendances d'évolution de la profondeur de l'habitat des salmonidés à la fois à l'échelle annuelle et saisonnière (Figure 48). Il est apparu que le réchauffement de la fraction superficielle du lac peut constituer une source de stress pour les espèces de poissons d'eau froide.

Principaux résultats et conclusions

- Les suivis limnologiques indiquent que la température de l'eau en surface (0–5 m) a augmenté de 1,0 °C depuis 1980. Les simulations précisent que cette tendance à la hausse devrait se maintenir, avec des scénarios vraisemblables prévoyant une augmentation de +2,1 °C d'ici à 2100. Nous posons comme hypothèse que cette augmentation représente le seuil minimum d'augmentation possible des températures, et que ces valeurs pourraient être dépassées de manière significative si les émissions mondiales de gaz à effets de serre se poursuivent. L'augmentation maximale dans le cas d'un scénario pessimiste pourrait atteindre jusqu'à +6,0 °C en 2100. En profondeur (60–65 m), la température devrait augmenter sensiblement seulement à partir de 2050, avec des rythmes de réchauffement plus lents de l'ordre de +1,0 °C (scénario optimiste) à +4,0 °C (scénario pessimiste) à l'horizon 2100.
- Le métalimnion estival, qui correspond à la couche intermédiaire entre l'épilimnion et l'hypolimnion dont la température varie rapidement avec la profondeur, devrait connaître un approfondissement marqué de sa limite inférieure en été de +4,0 m (soit à environ 19 mètres de profondeur) à la fin du siècle par rapport à la période de référence (1968–1998 : en moyenne à 15 mètres de profondeur) selon le scénario le plus pessimiste.
- La date de début de stratification ne devrait pas évoluer significativement d'ici à l'horizon 2100 et se maintenir aux alentours du mois d'avril. En revanche, le modèle prévoit une augmentation significative en intensité (approfondissement de la thermocline) et en durée de la stratification d'ici à 2050, pour ensuite atteindre un plateau sur la période 2050–2100 sans plus d'augmentation.

→ Les données de suivi et les simulations indiquent que les principaux changements dans le régime de brassage des eaux se sont déjà produits dans les dernières décennies (1970–2020) et qu'il est à parier qu'il y en aura d'autres à l'avenir, toutefois moins importants :

- La colonne d'eau devrait se brasser complètement chaque année jusqu'en 2100, à de très rares exceptions près.
- Le brassage permettra la réoxygénation annuelle des couches profondes, ce qui permettra de compenser la demande biologique et chimique en oxygène et limitera la solubilité des nutriments.
- Le brassage continuera ainsi de limiter le relargage de nutriments depuis les sédiments et permettra de limiter les pics de fertilisation de l'épilimnion lors de chaque brassage.

→ L'homothermie de la colonne d'eau, c'est à dire le brassage complet, devrait apparaître de plus en plus tardivement d'ici à 2050, avec un décalage temporel de début janvier à début février, avant d'atteindre un plateau. On note une variabilité interannuelle plus marquée à l'avenir dans la date du brassage complet, peu importe le scénario climatique considéré.

→ Les évolutions des températures vont aussi impacter les habitats et la biocénose, en particulier les salmonidés, poissons sténothermes d'eau froide ; les changements les plus importants sont à venir :

- L'élévation de la température dans les couches d'eau favorables à la reproduction des salmonidés en hiver (0–2 m pour le corégone et 30–40 m pour l'omble chevalier) pourrait impacter le taux de survie des œufs et le succès de la reproduction : le seuil maximal pour survie et reproduction de 8,0 °C pourrait ne plus jamais être atteint, avec des températures moyennes sur les couches favorables à la reproduction de 12,6 °C et 12,1 °C pour le corégone et l'omble chevalier, respectivement.
- Les températures optimales de l'habitat thermique des salmonidés devraient se maintenir sur l'ensemble de la colonne d'eau de janvier à mars, mais un approfondissement progressif de la profondeur à laquelle la température de l'eau est inférieure à 13 °C (seuil optimal) est attendu en été et automne. L'optimum des conditions d'habitat des salmonidés se restreindrait à 30%-54% du volume total du lac en fin d'été et automne à l'horizon 2100.
- Les salmonidés pourraient néanmoins s'adapter en occupant des strates situées plus en profondeur et retrouver ainsi des conditions favorables à leur croissance et à leur reproduction. Les conditions de substrat peu favorable et les faibles concentrations en oxygène dissous seront un facteur limitant.

→ Le lac devrait se maintenir à un état oligotrophe dans l'hypothèse où les apports en phosphore par les tributaires resteraient à des niveaux actuels.

→ Dans des conditions où les pollutions au lac n'augmenteraient pas par rapport aux niveaux actuels, l'attractivité générale du lac ne devrait pas être impactée négativement par les évolutions du climat, tout comme les services d'approvisionnement en eau potable.

Section 2.5 – Accélération de l'érosion et des exports de carbone allochtone il y a 4000 ans

Ayant pris conscience progressivement du poids déterminant des bassins versant dans le fonctionnement et dans la réponse lacustre sur le long terme, j'ai décidé de conduire un nouveau programme de recherche pour intégrer les bassins versant et les lacs dans une même approche, en recourant aux archives sédimentaires et à la modélisation de l'érosion, pour reconstituer les transferts (érosion, transferts, dépôts) sédimentaires et élémentaires, qui permettent d'établir la connexion entre le bassin versant et le lac.

L'érosion accélérée des sols est devenue une caractéristique omniprésente dans les paysages du monde entier et est reconnue pour avoir d'importantes implications sur la productivité des terres, la qualité de l'eau en aval et les cycles biogéochimiques notamment les exports de carbone vers les milieux aquatiques. Cependant, le manque de synthèses mondiales ainsi que les limites actuelles pour quantifier l'érosion avec les archives sédimentaires lacustres limite notre compréhension des variations temporelles, des causes et des conséquences de l'érosion des sols aux échelles de temps millénaires. En outre, comprendre la dynamique de l'érosion permettra de mieux appréhender l'intensité des exports de carbone terrestre vers les lacs et leur rôle à la fois dans leur contribution aux flux et stocks de carbone dans le lac.

C'est dans ce cadre que j'ouvre mes travaux pour mieux appréhender le rôle des bassins versants dans les exports de carbone terrestre vers les milieux aquatiques qui auront une importance essentielle pour la séquestration de carbone par les lacs.

Sommaire de cette section :

→ *Le premier volet adresse la question de la variabilité millénaire de l'érosion à l'échelle du monde observée avec les archives sédimentaires lacustres. Ce volet exploratoire a été réalisé en Allemagne dans le cadre de mon second postdoctorat (projet AXA), sous la supervision de Nuno Carvalhais (Max Planck, Jena). Cette méta-analyse visait plus particulièrement à :*

- *identifier les grandes variations millénaires de l'érosion à l'échelle du globe*
- *analyser la perturbation anthropique de l'érosion au cours des derniers milliers d'années*
- *dater et identifier l'étendue géographique de l'accélération de l'érosion*
- *Analyser le rôle du changement de paysage et du climat dans le contrôle de l'érosion*

→ *Le second volet cherche quant à lui à se recentrer sur quelques sites pilotes en Europe afin de préciser les variations centennales de l'érosion. Pour cela, ce volet développe une méthode de quantification des exports par l'érosion qui assimile archives sédimentaires lacustre et modélisation de l'érosion avec le modèle RUSLE. Ce volet s'inscrit essentiellement dans le projet ANR C-ARCHIVES et la thèse de Théo Mazure. L'étude entreprend de :*

- *Développer une approche couplée de modélisation et de paléolimnologie pour simuler et quantifier l'érosion passée (en t ha an⁻¹)*
- *quantifier localement dans les Alpes la contribution des crises érosives dans les exports totaux de l'érosion sur les échelles pluri-millénaires*
- *quantifier la contribution de l'érosion par incision (i.e. ravines) et de surface dans les exports de sols vers les milieux aquatiques*
- *Généraliser la méthode pour permettre de simuler l'érosion à l'échelle régionale et globale*

19. Reconstitution de la variabilité millénaire de l'érosion à l'échelle mondiale

Une collaboration que j'ai menée au cours de mon postdoctorat à l'Institut Max Planck a permis d'enregistrer les changements dans l'érosion des sols en analysant des dépôts de sédiments lacustres dans plus de 600 lacs à travers le monde. Les résultats, parus dans PNAS le 28 octobre 2019, suggèrent que les activités humaines ont intensifié l'érosion des sols bien avant l'ère industrielle (Jenny et al., 2019, 2020). Dans cette étude, nous avons reconstruit les taux de sédimentation pour 632 lacs en nous basant sur des chronologies contraintes par 3 980 âges calibrés au carbone 14, afin d'évaluer les variations relatives des taux d'érosion des lacs-bassins au cours des 12 000 dernières années (Figure 49). Les dynamiques estimées de l'érosion des sols ont ensuite été complétées par des reconstructions de l'occupation des sols déduites à partir de 43 669 échantillons de pollen, ainsi que par des séries chronologiques climatiques du modèle Earth System du Max Planck Institute. Les motivations et objectifs spécifiques :

- ➔ Intégrer une dimension globale à l'étude de l'érosion long-terme.
- ➔ Identifier la variabilité temporelle de l'érosion à large échelle spatiale
- ➔ Mieux comprendre les facteurs de contrôle de l'érosion sur le temps long.
- ➔ Appréhender les conséquences possibles sur le transfert de matière et de carbone des bassins versants vers les plans d'eau

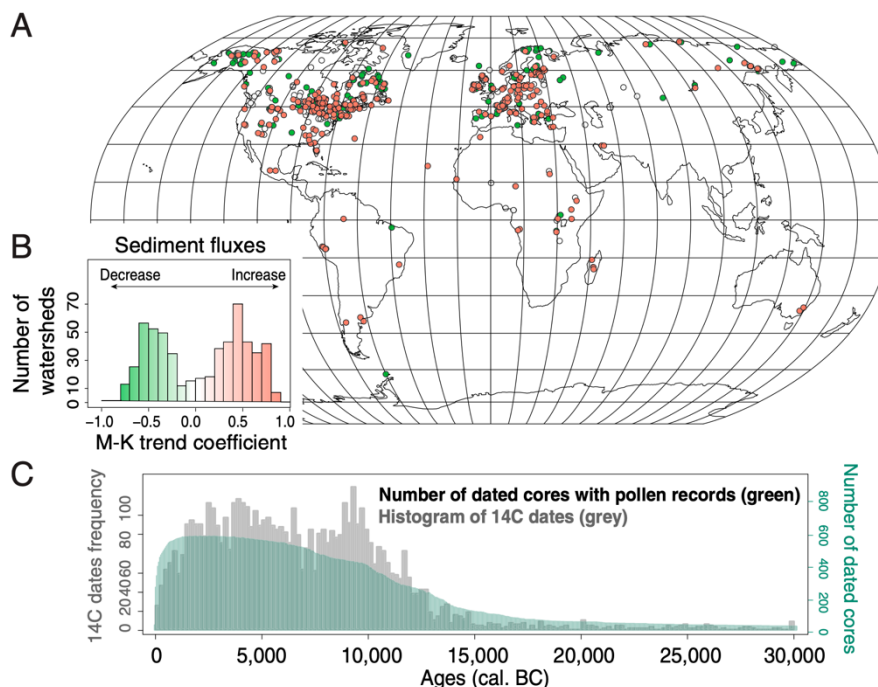


Figure 49. (A) Emplacement des 632 sites d'étude et variations des taux de sédiment lacustre au cours des 10 000 dernières années. Des augmentations des taux de sédiment lacustre (points rouges) ont été observées dans 35,1 % des bassins versants selon les coefficients M-K τ ; le reste des sites présente une diminution (points verts) ou des taux stables (points blancs). (B) Répartition des coefficients de tendance M-K τ . (C) Nombre de carottes datées contenant un enregistrement pollinique et répartition des dates au carbone 14 (intervalles = 12 000 ans) utilisées pour calculer les SARs (Jenny et al. 2019).

En nous servant des données de 14C, nous avons identifié les moments de la première augmentation de la sédimentation lacustre. Les changements dans les taux de sédiments lacustres à ce moment-là sont étroitement liés à l'augmentation de l'apport de sédiments provenant de l'érosion des pentes (Figure 50, 51). L'analyse des rôles relatifs des facteurs déterminants a indiqué qu'une partie importante de la surface de la Terre a basculé vers l'érosion des sols provoquée par l'homme il y a déjà 4 000 ans. Cette accélération est attribuée aux activités anthropiques - mises en évidence par la réduction du couvert forestier à la même période.

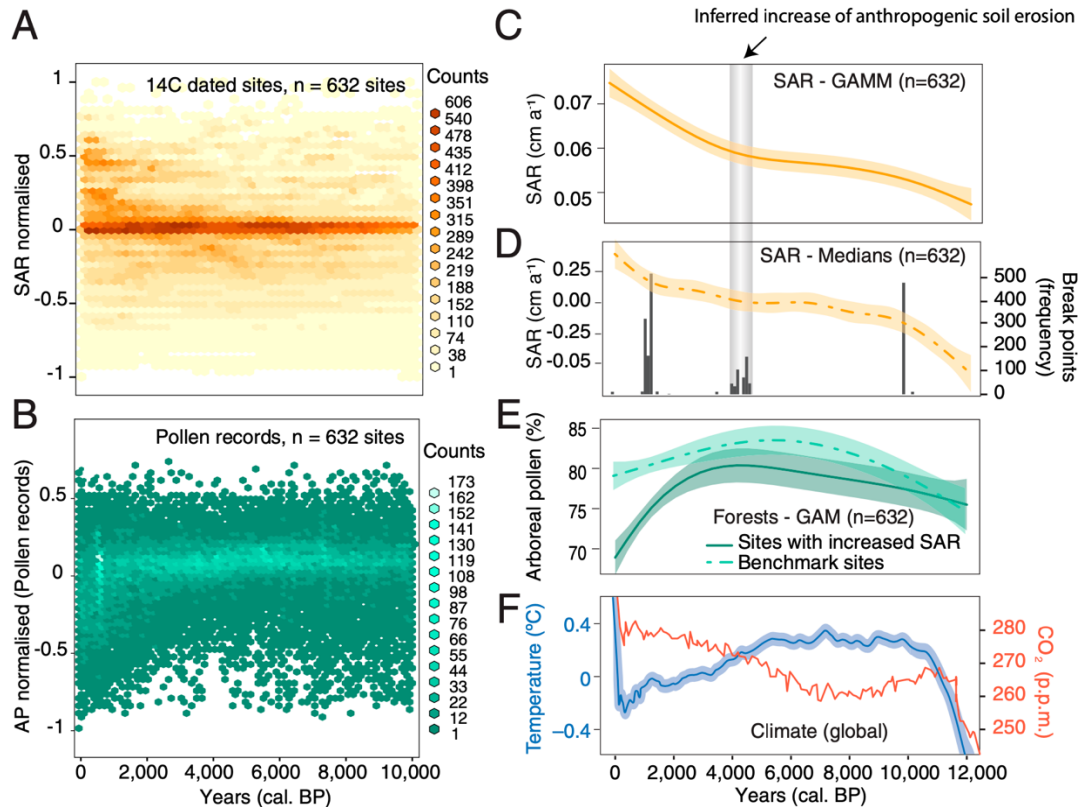


Figure 50. Tendances des accumulations sédimentaire lacustres (SARs, indice de l'érosion, dans des conditions de faible variation de la productivité primaire), de l'occupation des sols ainsi que des changements climatiques au cours de l'Holocène. (A et B) Diagrammes de densité des anomalies dans les SARs et les pourcentages d'AP (43 669 échantillons de pollen), respectivement, pour 632 sites datés au carbone 14 (3 980 âges 14C calibrés). Les tendances mondiales des SARs sont présentées dans 632 lacs sur la base d'un GAM, avec des intervalles de confiance à 95 % sur les moyennes prédites (C), ainsi que les tendances médianes des SARs calculées tous les 50 ans ($n = 632$ sites) et les points de rupture détectés sur la courbe des médianes des SARs, basés sur une distribution bootstrap (D). (E) Les changements d'occupation des sols sont présentés sous forme de tendances en pourcentage d'AP pour le sous-ensemble de sites ($n = 116$) enregistrant une augmentation des SARs au fil du temps (ligne verte solide), et pour un sous-ensemble de sites ($n = 287$) enregistrant des changements non significatifs des SARs au fil du temps, désignés ici comme sites de référence (ligne verte en pointillés). (F) tendances des anomalies de température mondiale (par rapport à la moyenne sur la période 1961-1990 en bleu) et du CO₂ atmosphérique (en rouge) à partir de la carotte de glace GRIP59 (issu de Lewis and Maslin, 2015). Tiré de Jenny et al. (2019).

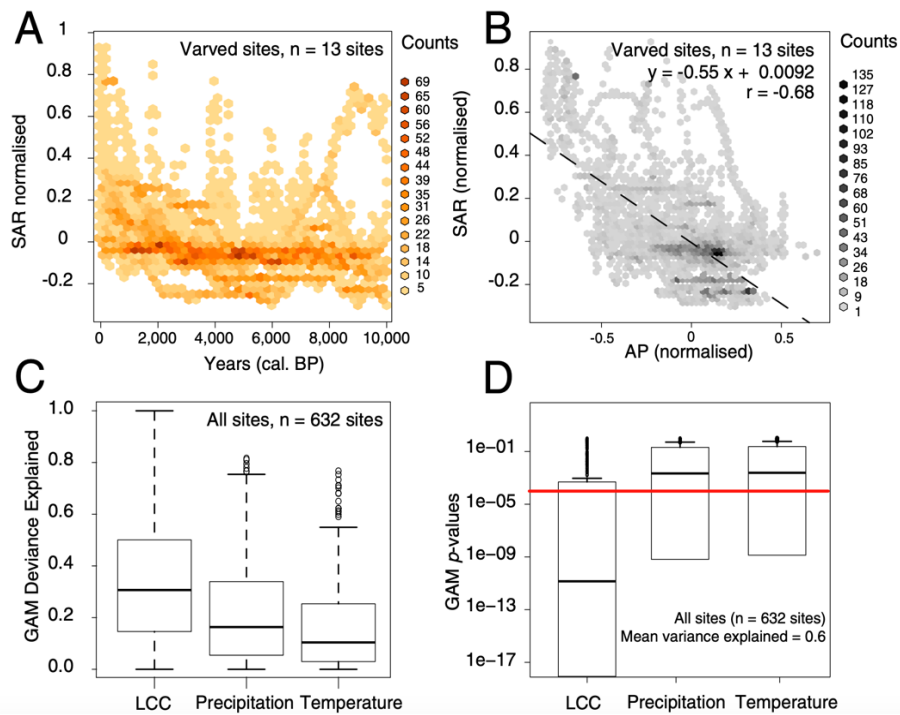


Figure 51. Tendances à l'échelle de l'Holocène dans 12 sites annuellement résolus avec varves. (A) Tendances normalisées des SARs en densité pour 12 lacs à varves. (B) Corrélation négative entre les SARs et la fraction AP des sites à varves. (C) Déviance expliquée dans les tendances des SARs par les changements de couverture terrestre, les précipitations et les températures dans les modèles GAM exécutés pour chacun des 632 sites datés au radiocarbone (14C). (D) Les modèles GAM ont été exécutés 632 fois, et les résultats de la valeur P informent sur la contribution de la LCC, des précipitations et de la température de l'air aux SARs (Jenny et al. 2019)..

En particulier, les taux d'érosion des sols déduits ont augmenté dans 35 % des bassins versants, et la plupart de ces sites ont montré une diminution de la proportion de pollen d'arbres, ce qui serait attendu avec l'ouverture du paysage et le défrichage des terres. Une analyse plus approfondie a révélé que le changement d'occupation des sols était le principal moteur de l'érosion des sols déduite dans 70 % de tous les bassins versants étudiés (Figure 51).

Les changements des SAR **au niveau régional** sont corrélés aux développements socio-économiques historiques des peuplements humains (Figure 52). Par exemple, l'augmentation des taux de sédimentation s'est produite plus tard en Amérique du Nord qu'en Europe. Cela correspond probablement à l'introduction tardive des pratiques agricoles européennes en Amérique du Nord après la colonisation. Au contraire, la diminution des SAR dans 23% des sites étudiés est probablement associée à une utilisation accrue de l'eau et à des pratiques de gestion des rivières.

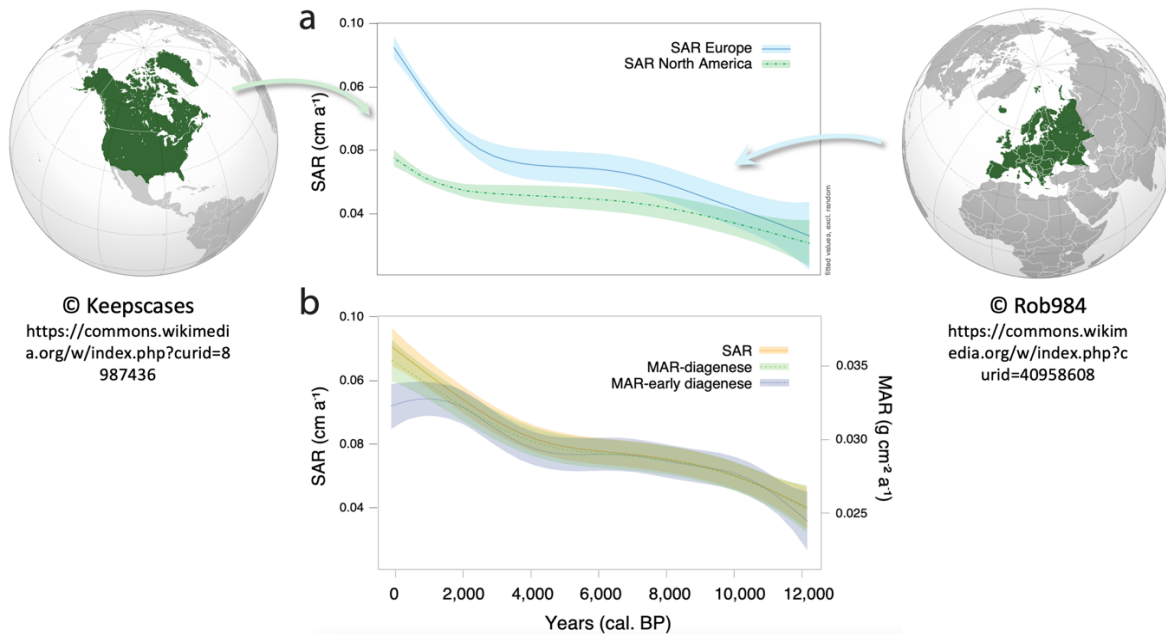


Figure 52. Tendances de l'érosion en Europe et en Amérique du Nord Durant l'Holocène mises en évidence par les SAR dans 632 archives paleo-environnementales lacustres. Le signal global de l'accélération de l'érosion est porté essentiellement par les sites en Europe. L'accélération de l'érosion en Europe s'est produite dès il y a 4000 ans alors qu'en Amérique du Nord l'augmentation est beaucoup plus tardive et semble s'initier ces derniers siècles seulement, suggérant un décalage causé par la colonisation et l'export des pratiques Européennes.

La perspective à long terme offerte par cette synthèse prouve que les êtres humains sont une force géologique qui a modifié les transferts latéraux de sol et de sédiments à l'échelle mondiale bien avant la grande accélération de l'activité humaine après la Seconde Guerre mondiale et avant le début de la révolution industrielle. Cette étude suggère en outre que l'érosion des sols a altéré les écosystèmes terrestres et aquatiques pendant des millénaires, entraînant des pertes de carbone (C) qui auraient finalement pu induire des rétroactions sur le système climatique.

Cette approche large-échelle permet d'identifier un signal global mais doit être impérativement complémentaire d'approches de détails à l'échelle locale des bassins versants qui permettent d'offrir plus de marqueurs et plus de résolution dans les reconstitutions. Dans cette perspective, des travaux ont été engagés dans la continuité des recherches conduites depuis quinze ans au laboratoire EDYTEM à l'USMB.

20. Quantification de la variabilité centennale de l'érosion de surface, de l'érosion par incision et des crises érosives

Dans le cadre de l'ANR C-ARCHIVES et du projet MITI C-Sensible, une étude a été conduite sur un échantillon plus resserré de bassins versants. Une nouvelle approche a été appliquée combinant des enregistrements paléo-historiques bien datés de l'érosion des sols à partir de sédiments lacustres, issus des études conduites à EDYTEM (e.g. Arnaud et al., 2016), et un modèle semi-empirique distribué spatialement pour simuler l'érosion annuelle des sols dans six systèmes de bassins versants lacustres des Alpes du Nord-Ouest pendant l'Holocène (Mazure et al., 2024) (Figure 53).

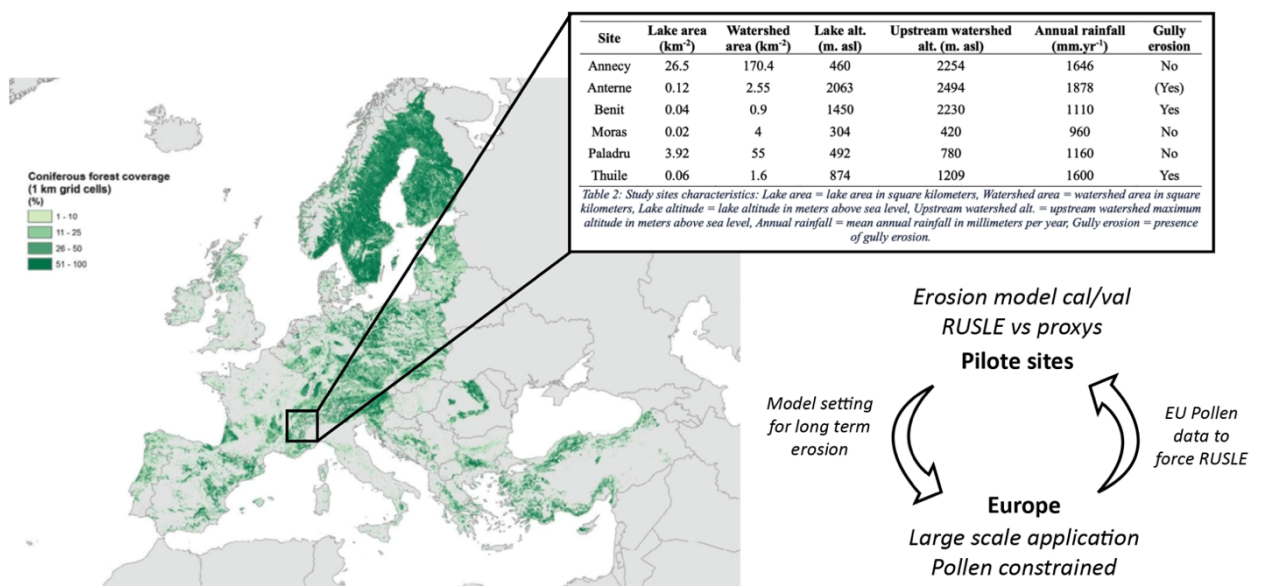


Figure 53. Développement d'une approche d'assimilation de modèle spatialisé d'érosion et des proxys d'érosion (flux terrigène) et d'occupation du sol (pollens et/ou modèle paysage). Les sites pilotes sont richement pourvues en données paléo-environnementales pour caractériser l'érosion, le paysage, les accumulations et sources de carbone.

L'impact long-terme de l'érosion diffuse sur les pertes de sols a été simulé avec la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE, Renard et al., 1997). RUSLE est un modèle semi-empirique et parcimonieux permettant d'estimer les taux d'érosion spécifiques liés à l'érosion hydrique en nappe et en rigoles (E) en prenant en compte les principaux facteurs d'érosion diffuse que sont l'érosivité de la pluie (R), l'érodibilité du sol (K), la longueur et l'inclinaison de la pente (LS), l'utilisation du sol (C) et la conservation du sol (P). Les simulations sont menées pour reconstruire l'érosion long-terme dans une unité consensuelle (i.e., taux d'érosion spécifique, t.km⁻².an⁻¹) favorisant la comparaison inter-sites. Ce modèle a déjà été utilisé pour estimer l'érosion diffuse au sein des surfaces agricoles et à différentes échelles spatiales (e.g. Kinnell, 2010) sur des périodes annuelles à pluri-annuelles (e.g. Naipal et al., 2015) mais très peu pour les échelles de temps millénaires.

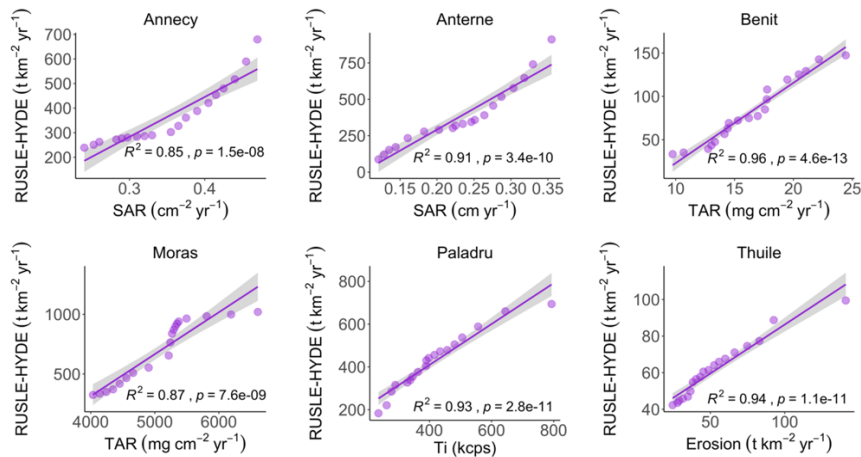


Figure 54. Régressions entre érosion simulé par le modèle RUSLE et les proxys sédimentaires. Ces régressions ne tiennent pas en compte les périodes de crise érosives. Les bonnes corrélations suggèrent que le modèle RUSLE peut être utilisé pour estimer les tonnages d'érosion sur le temps long (Mazure et al., 2024).

L'érosion simulée a en premier lieu été corroborée sur la période actuelle grâce aux taux d'érosion estimés via des mesures de terrain (Hinderer et al., 2013) et via des exercices de modélisation sur l'actuel disponibles dans la littérature (Panagos et al., 2015). Sur le long-terme, certains proxys exprimés en taux d'érosion (Bajard et al., 2017; Rapuc et al., 2024) ont pu être utilisés pour corroborer la variabilité temporelle des simulations d'érosion (Figure 54).

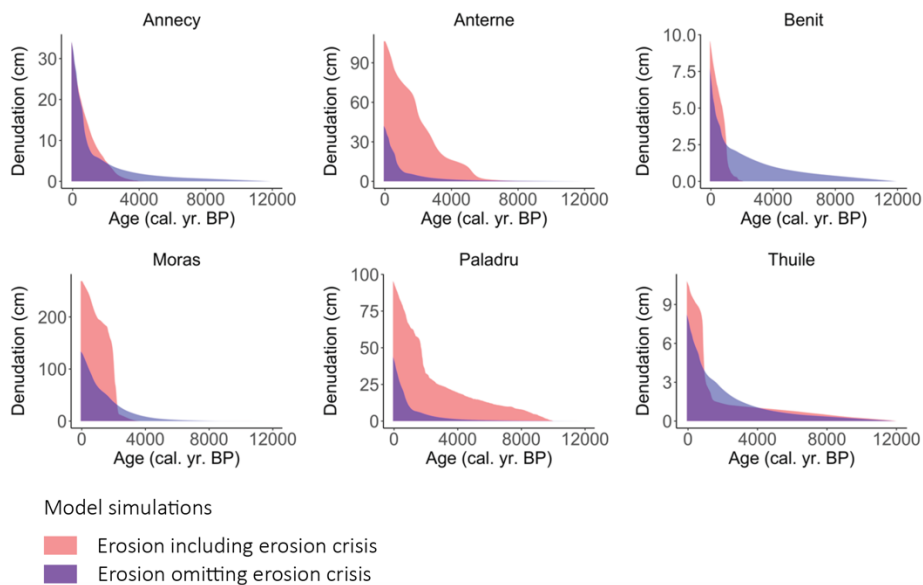


Figure 55. Simulations de l'érosion sur l'Holocène pour les six sites pilotes. Les simulations ont été conduites à la fois avec et sans tenir compte des crises érosives. Les résultats indiquent que 50% des exports de l'érosion des sols est attribué aux crises érosives (Mazure et al., 2024).

Nos observations indiquent que des changements 1) progressifs et 2) abrupts de l'érosion des sols sont détectés dans les six bassins versants, ce qui est en adéquation avec les études précédentes (Arnaud et al., 2012). L'érosion progressive explique la plupart des exportations de sol observées pendant la période de l'Holocène précoce à moyen (de 11 700 à 3 000 ans cal. BP), tandis que les crises d'érosion transitoires

(c'est-à-dire des périodes d'augmentation brutale des taux d'érosion s'étalant sur environ $1\ 000 \pm 500$ ans) ont conduit à des pertes massives de sol pendant la période de l'Holocène tardif (de 3 000 à 1 000 ans cal. BP).

Nos principaux résultats montrent que les crises d'érosion représentent la moitié des exportations totales d'érosion des sols au cours de l'Holocène. Ces estimations défont les représentations actuelles de l'érosion des sols à grande échelle au cours de l'Holocène qui ne tiennent pas compte des crises d'érosion transitoires, sous-estimant ainsi potentiellement la perturbation anthropique des flux latéraux et du devenir le long du continuum terre-océan. Nos résultats suggèrent en outre que les proxys d'érosion et/ou de couverture terrestre doivent être systématiquement intégrés dans les approches de modélisation lorsqu'on tente d'estimer les variations passées des exportations massives des écosystèmes terrestres vers les écosystèmes aquatiques sur des échelles de temps centenaires à millénaires.

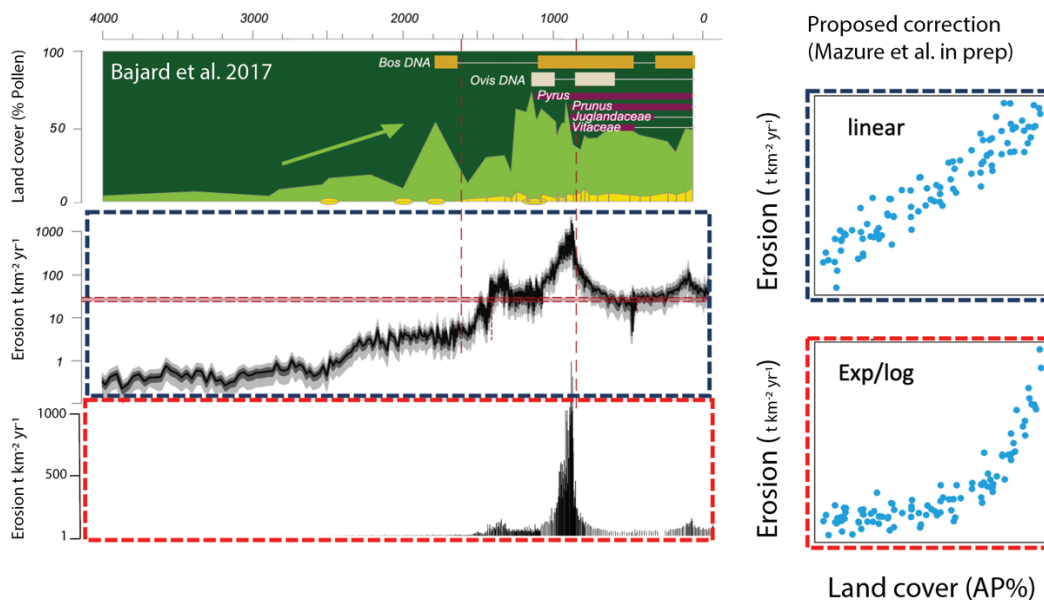


Figure 56. *L'érosion et l'ouverture du paysage sont liés. Les données paléo-environnementales indiquent que la relation n'est pas linéaire mais relève plutôt de la famille exponentielle. Cette observation est en cours de généralisation sur six sites, ce qui permettrait de prédire l'érosion passée à partir de données de reconstitution du paysage (issues des données polliniques, Mazure et al. in prep).*

De nouvelles relations empiriques qui lient érosion et ouverture du paysage (Figure 56), non-linéaires, permettront de réviser les estimations de l'érosion à l'échelle de l'Europe (Mazure et al. soumis).

21. Nécessité de poursuivre l'intégration des modèles et des données paléolimnologiques

Durant mes deux postdocs je suis devenu l'initiateur de la première base de données multi-proxies standardisées de paléolimnologie à l'échelle globale pour décrire et caractériser les flux de C séquestrés dans les sédiments lacustres (Figure 57). Ce projet est toujours en cours de valorisation dans le cadre de mon projet INRAE. Pour cela j'ai dirigé une mission de collecte intensive (en termes de nombre d'échantillons) réalisée au National Lacustrine Core Facility (LacCore) de l'Université du Minnesota (USA) en collaboration avec l'INRS et le département de biologie de l'Université McGill. Au total, 14,000 échantillons sédimentaires issues de 400 lacs du monde ont été collectés et envoyés à l'Institut Max Planck pour y être analysés.

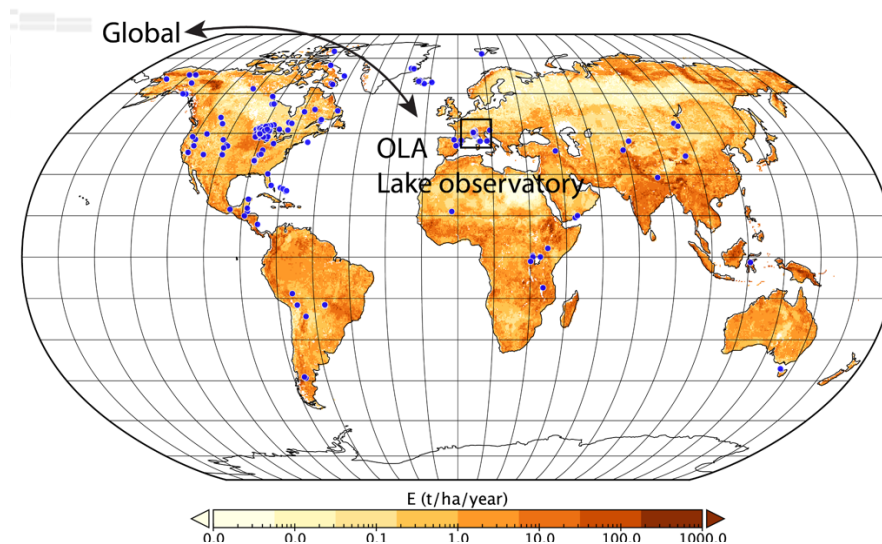


Figure 57. Distribution des sites d'étude multi-proxys LACORE et des sites de OLA pour l'analyse de l'évolution des stocks de carbone sédimentaire lacustres : mesures standardisées C,N et μ -XRF comprenant 10 analyses minimum par section étudiée.

Les études en cours à INRAE permettront de compléter cette approche globale en étudiant le détail de la séquestration de carbone sur les lacs de l'observatoire OLA (Figure 57).

Volet 3 Perspectives de Recherche pour une estimation globale des flux et stocks de carbone lacustres

Section 3.1 – Intégrer modèles et synthèses paléolimnologiques pour une évaluation mondiale du rôle des eaux lenticques dans le système climatique : de la formation des stocks de C aux émissions de GES (Projet PEPR FairCarboN)

Les perspectives pour ces cinq prochaines années se structurent autour du Projet PEPR FairCarboN que je coordonne pour la période 2023 à 2028, incluant un consortium de 40 scientifiques, dont 6 collègues du CARRTEL. Mon implication forte dans un projet ciblé du même PEPR FairCarboN (réfèrent pour 2 WPs, membre du COPIL) permettra d'étendre les collaborations, d'intégrer davantage de collègues du CARRTEL et de renforcer les activités des cinq prochaines années.

Ce projet permet d'établir une continuité et une cohérence forte dans mes activités, tout en intégrant désormais les émissions des GES. Je compte maintenir une équipe dans l'unité CARRTEL pour renforcer l'expertise d'assimilation autour des lacs. La partie modélisation du bassin versant (écosystème terrestre, érosion et exports de CNP) sera quant à elle principalement confiée aux collègues INRAE du laboratoire EcoSyS (Paris).

Contexte, objectifs et motivation

- *La formation de stocks de carbone et les émissions de GES lacustre sont considérées comme importants dans le système climatique de la Terre, mais mal contraint en raison de la quantité et de la qualité insuffisantes des observations.*
- *Les observations sont très sporadiques et ne tiennent pas compte de la grande variabilité spatiale et temporelle des émissions et de la formation des stocks.*
- *Quant aux données pour caractériser l'évolution long-terme des émissions de GES (de plusieurs décennies à la centaine d'années), elles sont inexistantes.*
- *Dans ce contexte, consortium national (PEPR FairCarboN DEEP-C, PI : JP Jenny) a été initié pour densifier les données sur le territoire français, conduire des synthèses mondiales et pour recourir à la modélisation afin d'estimer localement et globalement l'évolution de la formation de stocks de C et d'émission de GES des plans d'eau et aux échelles de temps long.*

Résumé du programme Les eaux lenticques sont des réacteurs biogéochimiques, recevant du carbone (C) fixé à l'origine par la biosphère terrestre, qui est ensuite enfoui dans les sédiments et/ou renvoyé dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄), un gaz à effet de serre (GES) puissant. Dans le même temps, les sédiments lacustres sont des archives importantes des processus du C terrestre, utilisés pour reconstituer les changements dans les processus du carbone terrestre sur des milliers d'années, permettant en outre de documenter les changements d'occupation du sol (enregistrements polliniques) et les changements dans l'érosion du sol et des exports de carbone.

La formation de stocks de C et les émissions de GES sont mal contraintes. Les modèles basés sur les processus qui représentent les cycles biogéochimiques couplés lacs & bassin versant semblent le meilleur outil à disposition pour extrapoler des observations des sites aux échelles régionales et mondiales, pour quantifier l'impact anthropique sur ces flux et pour reconstituer les changements à long terme. Mais le développement et l'évaluation de tels modèles sont entravés par le manque d'observations de qualité suffisante. Dans ce projet, nous réunissons un consortium unique de spécialistes en biogéochimie aquatique, palynologie, sédimentologie et modélisation de la biogéochimie terrestre et aquatique. Ce projet mettra en avant un programme national d'observations systématiques à long terme des processus des émissions de GES et des accumulations sédimentaires de C lacustre sur 40 sites pilotes, complété par une synthèse des données existantes (WP1). De plus, sur la base d'enregistrements sédimentaires bien datés, la variabilité de la formation des stocks de C lacustre et les facteurs de contrôle liés au climat et à l'occupation des sols seront reconstitués et analysés au cours des 150 dernières années (WP2). Pour ~15 de ces sites, la reconstruction remontera jusqu'au milieu de l'Holocène (5 000 ans BP), permettant d'éclairer la perturbation anthropique du cycle du C dans cette partie reculée de l'histoire humaine, communément exclue de ce type de recherche par manque d'information. Les activités de ces deux premiers WP aboutiront à une base de données nationale open-source, garantissant la valorisation de nos recherches bien au-delà de ce projet.

Dans le WP3, nous utilisons le modèle de surface terrestre (LSM) ORCHIDEE C-lateral pour évaluer le cycle du C dans la biosphère terrestre et la mobilisation du C biosphérique dans les lacs, grâce à une représentation explicite des processus de lessivage et d'érosion du C du sol et un système de mise à l'échelle permettant d'évaluer les exports de carbone des bassins versants. Alors que les LSM sont utilisés pour évaluer l'évolution des bilans biosphériques de C depuis le début de la période industrielle, nous les utiliserons pour faire une rétrospective depuis le milieu de l'Holocène, en utilisant les enregistrements de sédiments lacustres pour la validation du modèle. De plus, nous développerons un nouveau modèle du cycle du carbone des lacs basé sur les processus soutenus par la base de données établie dans les WP 1 et 2, que nous couplerons à ORCHIDEE C-lateral pour simuler l'accumulation sédimentaire lacustre de C et les émissions de GES en réponse aux changements climatiques et aux processus dans le bassin versant du lac. Cette configuration de modèle sera d'abord utilisée pour mieux contraindre les émissions contemporaines de GES des lacs à grande échelle et pour différencier la perturbation anthropique de ces flux du flux naturel. Ces estimations seront révolutionnaires, car elles permettront d'estimer la part des émissions de GES lacustres liées aux émissions anthropiques, nécessaires pour les rapports et les inventaires nationaux des GES. Ensuite, ces modèles seront émuloés pour reconstruire l'évolution des bilans GES des lacs et des bilans C de l'ensemble du bassin versant du lac depuis le milieu de l'Holocène. Alors que les simulations seront d'abord réalisées à l'échelle de la France et de l'Europe, le développement de partenariats internationaux pour mettre en œuvre les observations d'autres biomes (WP4) permettra enfin de soutenir les simulations à l'échelle mondiale. Le cadre général, le positionnement des WPs dans le système lac-BV est indiqué Figure 58, 59, 60.

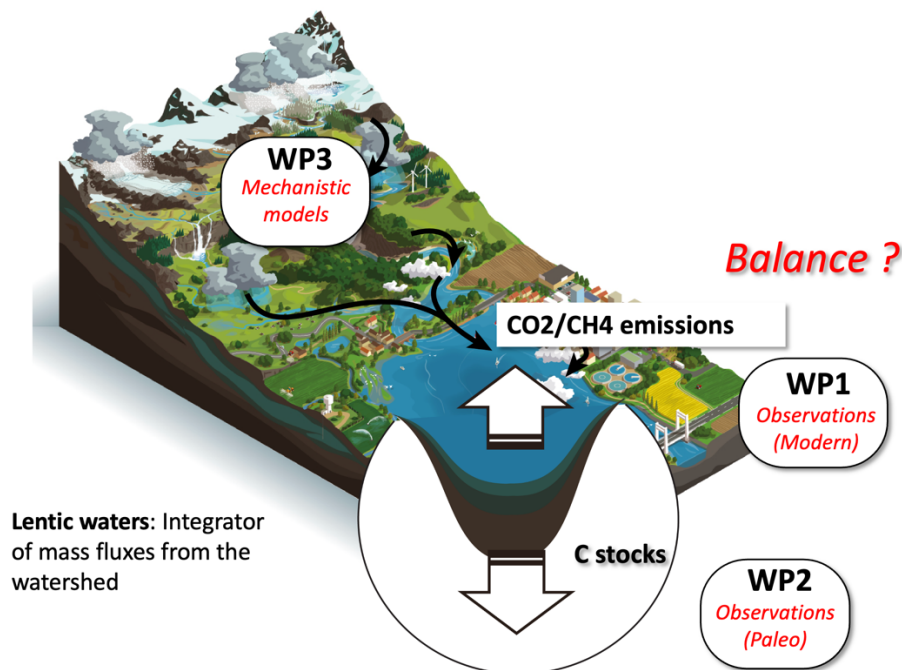


Figure 58. Le système lac-bassin versant - Unité spatiale de base de l'étude. Panel du haut : L'évolution des émissions net de carbone (i.e. rapport entre formation de stocks de C vs émissions de GES) sera étudié à partir de nouvelles mesures de terrain, de synthèses et de modèles (Lacs et LSM). Les archives sédimentaires seront utilisées pour reconstruire la variabilité temporelle passée de la formation des stocks de C lacustres, d'origine du carbone, de la production primaire de C. Pour les sites pilotes, seront reconstitué également le paysage à partir des pollens fossils et le signal de l'érosion des sols.

Le consortium DEEP-C est une équipe multidisciplinaire composée de 10 partenaires français: CARTEL (INRAE), EDYTEM (CNRS), IPGP (IPGP), Chrono-Environnement (CNRS), LEHNA (VNRS), EDB (CNRS), ISEM (CNRS), GEODE (CNRS), ÉcoSys (INRAE), SAS (INRAE), ISTO (CNRS), et de 3 partenaires issus de Belgique, Allemagne, Canada (Université Libre de Bruxelles, Max Planck for Biogeochemistry, Université du Québec à Montréal).

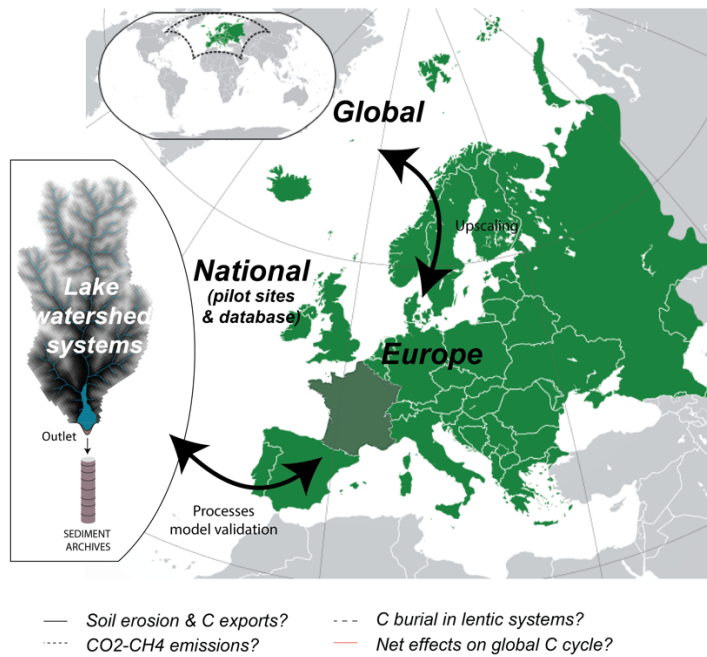
Les membres du consortium comprennent : Patrick Durand (INRAE), Isabelle Domaizon, Ronny Lauerwald, Didier Jezequel, Jean-Philippe Jenny, Etienne Dambrine (INRAE), Emilie Lyautey, David Etienne, Jérôme Poulénard, Pierre Sabatier (USMB), Jérôme Gaillardet (IPGP), Laurent Millet, Fanny Colas, Valérie Verneaux, Fabien Arnaud, Mathieu Dellinger, Charline Giguët-Covex, Erwan Messenger, Hélène Masclaux, Damien Rius, Georges-Marie Saulnier (CNRS), Vincent Chanudet (EDF), Nuno Carvalhais (Max Planck), Yves Prairie (UQAM), Pierre Regnier (ULB).

Objectifs détaillés et contexte

Au cours des 15 dernières années, les eaux continentales ont attiré une attention croissante dans les recherches sur le cycle global du carbone (C) : en tant que lien entre les compartiments terrestres et océaniques du cycle du C, en tant que source importante de CO₂ et de CH₄ vers l'atmosphère, et en tant que puits de C sédimentaire (Cole et al., 2007; Lauerwald et al., 2015; Liu et al., 2022; Raymond et al., 2013; Tranvik et al., 2009). Le manque de fiabilité dans les estimations des émissions de CO₂ et de CH₄

provenant des plans d'eau est dû à la qualité et quantité insuffisante des observations, à la complexité des processus physiques et biogéochimiques régissant ces flux, et à l'absence de modèles adaptés pour une mise à l'échelle basée sur les processus. Alors que les eaux courantes sont bien mélangées, favorisant la mesure de concentrations représentatives de gaz à effet de serre, les plans d'eau stagnants montrent souvent une plus grande hétérogénéité interne. De plus, l'alternance saisonnière de stratification et brassage des lacs, complique la relation entre la production et les émissions de GES. Malheureusement, la plupart des campagnes de prélèvement sur les plans d'eau ne sont pas conçues pour tenir compte de cette variabilité spatiale et temporelle interne, ce qui entraîne facilement de grandes incertitudes, voire des biais, dans les estimations des émissions de CO₂ et de CH₄. En outre, la répartition géographique inégale des observations et la sous-représentation de systèmes spécifiques, tels que les petits lacs et les barrages, exigent une prudence accrue à l'égard des estimations des budgets régionaux à mondiaux de CO₂ et de CH₄ des plans d'eau basées sur des observations. De même, le stockage de C dans les sédiments aquatiques reste mal quantifié à des échelles régionales et mondiales pour des raisons similaires.

A. Study sites (data synthesis & new data)



B. Spatial scales (data collection to support WP3)

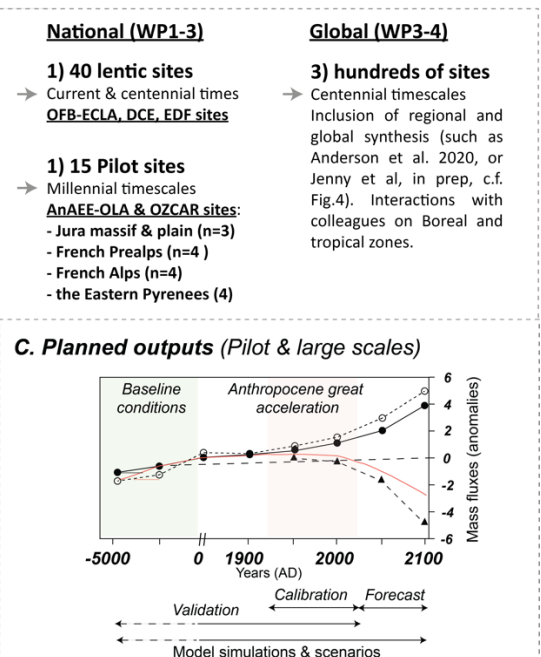


Figure 59. Sites d'étude (A), données d'entrée pour contraindre les modèles de surface terrestre et de lac, et données d'observation collectées pendant DEEP-C pour la validation des modèles (B), exemple de résultats prévus concernant les tendances des exportations de carbone, des émissions de CO₂-CH₄ et de la séquestration dans le réseau d'eau douce.

Dans ce contexte, la meilleure stratégie pour réaliser des extrapolations à large échelle à partir des observations locales serait un cadre de modélisation basé sur les processus, représentant le cycle biogéochimique couplé dans les plans d'eau et leur bassin versant connecté.

La performance des modèles actuels reste limitée. L'une des raisons est que la compréhension quantitative des processus issus des études expérimentales de terrain n'est pas encore disponible en

quantité et en qualité suffisantes. L'autre raison est que les approches de modélisation existantes n'ont pas encore réussi à coupler la dynamique du C dans les plans d'eau à la dynamique physique et biogéochimique de leur bassin versant, qui contrôle les apports d'eau, de sédiments, de C et de nutriments. Enfin, la difficulté réside également dans l'incapacité des modèles et des données à capturer l'évolution temporelle, de l'événement aux changements saisonniers à long terme, ce qui motive le couplage entre les approches actuelles, centennales et millénaires.

L'objectif principal de ce projet est d'améliorer substantiellement notre compréhension du cycle du C dans les plans d'eau, allant des étangs agricoles et des gravières aux grands lacs et réservoirs, en se concentrant sur les flux de stockage de C à long terme (c'est-à-dire à la fois centennal et millénaire) dans les sédiments et les émissions de CO₂ et de CH₄ en réponse aux activités humaines et au changement climatique. Nous cherchons à utiliser ces connaissances pour quantifier la contribution des plans d'eau aux budgets terrestres de C et de GES de l'échelle locale à mondiale. Tout d'abord, nous nous efforçons d'obtenir des estimations mieux contraintes pour la période actuelle. De plus, pour intégrer ces estimations dans les budgets carbone et de GES à des échelles nationales, européennes et mondiales pertinentes pour les politiques, DEEP-C quantifiera la composante naturelle de ces flux et leurs perturbations anthropiques, résultant de la variabilité des apports de C et de nutriments au cours des siècles. Placer notre travail dans une perspective centennale permettra d'examiner les principaux contrôles des flux et des stocks de C (Figure 59, 60).

Deuxièmement, en plus de l'échelle temporelle centennale, DEEP-C cherchera à reconstruire l'évolution millénaire du cycle du C local à mondial dans les plans d'eau en réponse aux changements de l'utilisation des terres et du climat au cours des 5 000 dernières années. Ainsi, nous mettrons en question la représentation actuelles des flux de C de l'Anthropocène qui tendent à considérer l'état préindustriel du cycle global du C comme état presque naturel.

DEEP-C fournira donc de nouvelles réponses à des **questions fondamentales** : Quelle est la contribution des eaux lenticques au budget terrestre du C aux échelles annuelle à millénaire ? Quels sont les impacts des usages des sols et du changement climatique sur les émissions de GES et la formation de stocks de C dans les eaux lenticques ? Comment le ratio entre les taux d'émissions et de stockage dans les systèmes lenticques a-t-il évolué au fil du temps ? Quels sont les principaux contrôles à travers les échelles spatiales et temporelles ? **Ce travail vise à réduire les incertitudes du budget global du C en nécessitant une meilleure compréhension des émissions de CH₄ dans les eaux lenticques (le terme le plus incertain du budget) explicitement mentionnée dans le dernier rapport du GIEC AR67.**

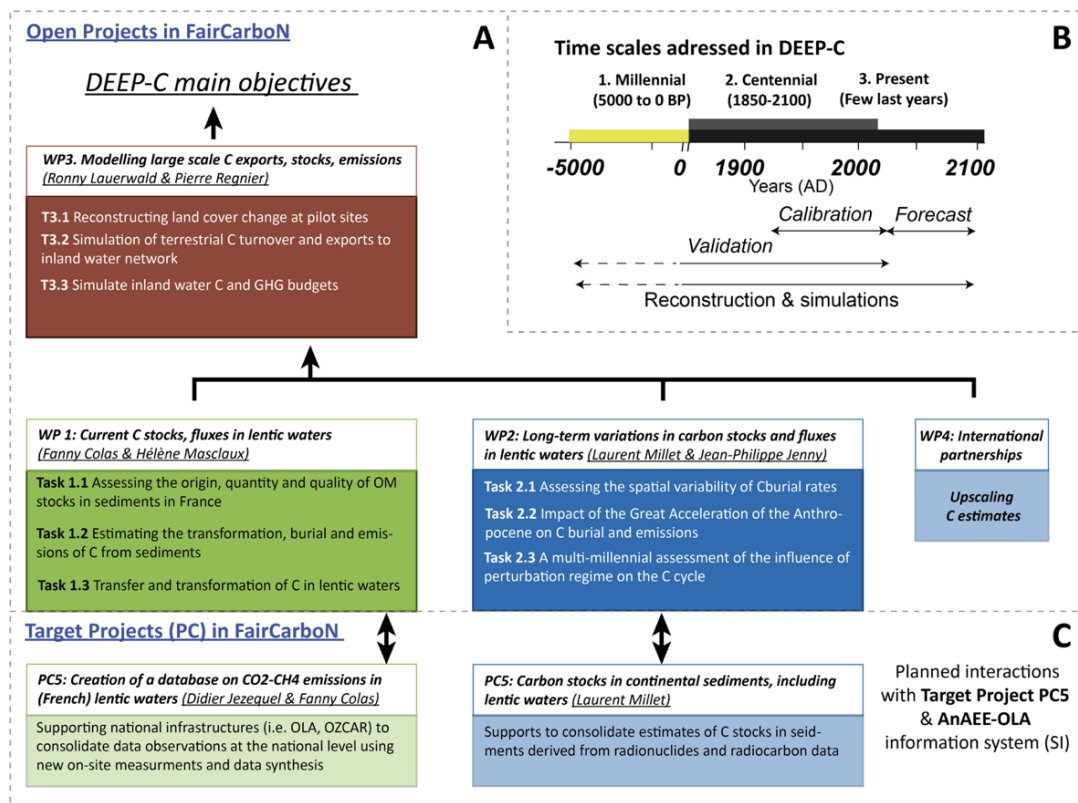


Figure 60. Structure générale de DEEP-C, A) worgroupes, B) échelles de temps, C) interactions avec le projet cible (PC5) dans FairCarboN et le système d'information AnAEE-France OLA (SI).

WP 1 : Évaluation des stocks actuels de carbone, des flux et des facteurs déterminants dans les eaux lenticques au niveau national

L'objectif de WP1 (Figure 61) est de fournir des estimations robustes des stocks actuels de carbone et des émissions provenant des écosystèmes lenticques, et d'examiner les contrôles abiotiques et biotiques impliqués dans le devenir du carbone organique stocké. Pour atteindre cet objectif, WP1 examinera 40 systèmes lenticques en France, couvrant un large gradient d'occupation des sols, de conditions climatiques et de types d'eau, y compris des lacs naturels et artificiels, des étangs et des gravières. Le travail sur le terrain et en laboratoire dans ces 40 sites sera complété par une synthèse des données disponibles, publiées ou issues de la littérature grise.

Le WP1 est structuré en trois tâches interconnectées : La **tâche T1.1**) se concentre sur la quantification et la caractérisation du carbone dans les sédiments de surface ; la **tâche T1.2**) évaluera le devenir du carbone (c'est-à-dire la séquestration par rapport à la minéralisation), les voies métaboliques et la diversité microbienne impliquées dans la transformation du carbone ; la **tâche T1.3**) se penchera sur les émissions de CO₂ et de CH₄ à partir des sédiments. T1.3 évaluera également les transferts de CO₂ et de CH₄ au sein des réseaux trophiques benthiques et pélagiques, ainsi que leur évacuation vers l'atmosphère. Les trois tâches du WP1 examineront également les contrôles et les processus impliqués dans le cycle du carbone. La collecte de données dans le WP1 sera planifiée et coordonnée avec le WP2 et le WP3, ainsi qu'avec deux actions faisant partie du projet cible PC5 dans FairCarboN.

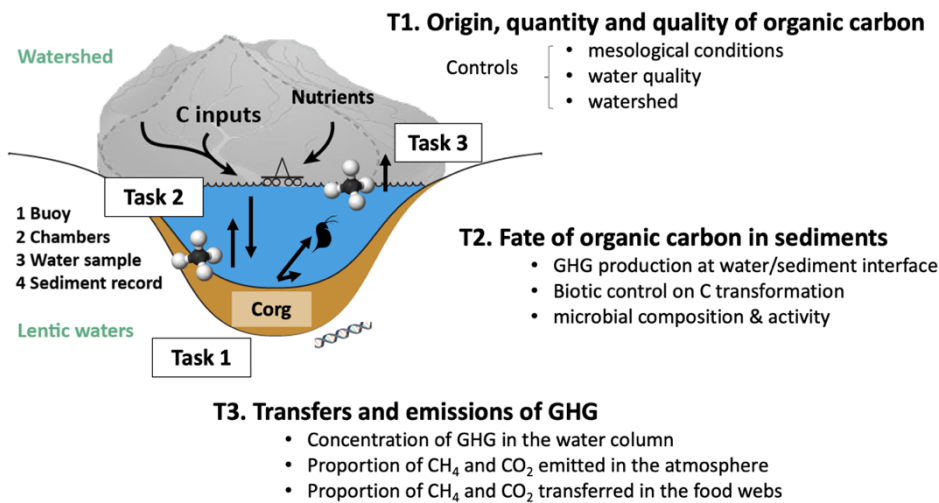


Figure 61. Résumé des tâches dans le WP1 centrées sur les mesures actuelles des flux de GES et de l'accumulation de carbone sédimentaire. En outre, les variables explicatives sont étudiées et les données limnologiques collectées dans les sites sélectionnés pour la calibration des modèles en interaction avec le WP3.

WP2 : Variations à long terme des stocks et flux de carbone dans les eaux lenticques

Responsables : Laurent Millet (CEN) & Jean-Philippe Jenny (CARTEL), Participants : 8P

L'objectif de WP2 (Figure 62) est de consolider les (paléo)observations et d'évaluer les stocks, les sources et les facteurs déterminants du carbone dans les systèmes lenticques sur des échelles de temps centennales et millénaires (voir Fig. 2) en utilisant des archives sédimentaires bien datées. Les tâches du WP2 sont les suivantes :

Les objectifs spécifiques seront les suivants : **tâche T2.1**) collecter et analyser de nouvelles données empiriques sur le carbone (qualité et quantité) à partir de carottes de sédiments courts, **tâche T2.2**) évaluer les effets centennaux de l'eutrophisation et du climat sur l'enfouissement du carbone dans 40 systèmes lenticques, **tâche T2.3**) étudier les tendances millénaires en matière d'érosion, d'exportations de carbone et de stocks de carbone dans les systèmes lenticques, et tester la stationnarité de ces flux ainsi que les interactions potentielles, telles que le rapport érosion:exportations de carbone, qui renseigne sur la relation entre l'érosion et les exportations de carbone au fil du temps. Les ensembles de données sur les stocks de carbone utilisés pour les simulations mondiales du cycle du carbone dans le réseau aquatique intérieur révèlent des lacunes et des disparités majeures (par exemple, seulement quatre eaux lenticques en France jusqu'à présent)⁹, stimulant ainsi la recherche dans le WP2.

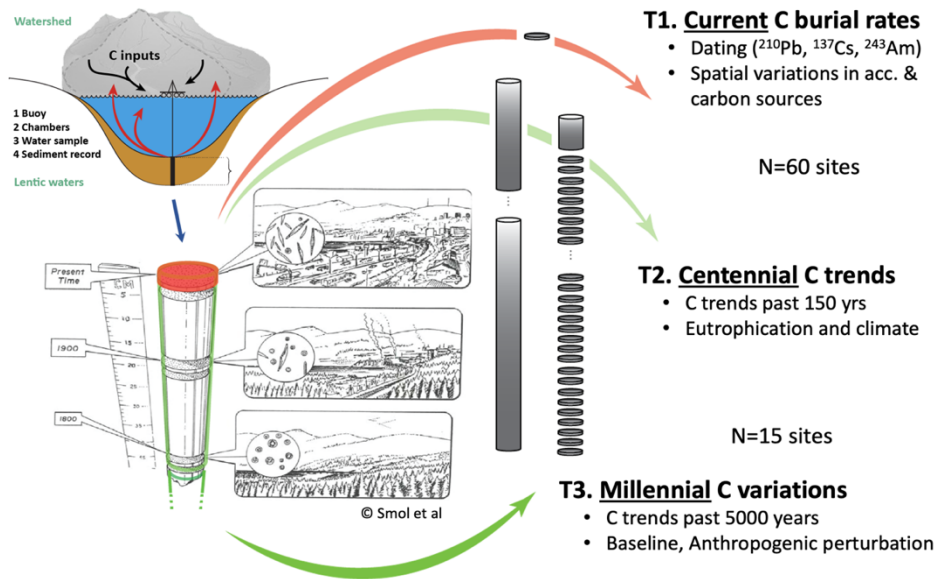


Figure 62. Résumé des tâches dans le WP2 centrées sur les mesures passées de l'accumulation de carbone sédimentaire. Les échelles de temps considérées vont des derniers 150 ans à plus plusieurs milliers d'années afin d'accéder aux conditions de bases non perturbées par les activités humaines.

WP3 : Modélisation des exportations, stocks et émissions de carbone à grande échelle
Responsables : Ronny Lauerwald (EcoSys) & Pierre Regnier (ULB), Participants : 7P

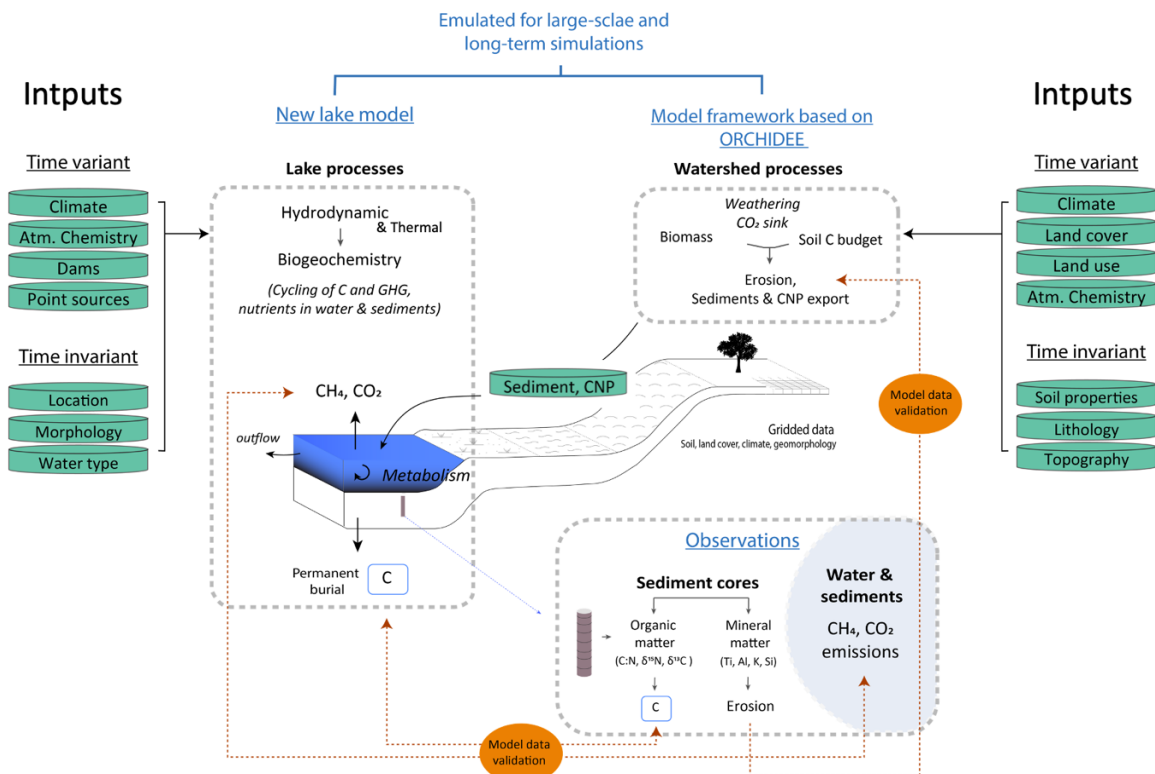


Figure 63. Résumé de l'organisation du WP3 centré sur la modélisation et l'intégration des données de stocks et de flux de carbone synthétisés et collectés dans les WP1-2. Modèles de bassin versant et de lacs sont couplés pour reconstituer les flux et stocks de carbone à l'échelle des bassins versants lacustres sur les milliers d'années.

Le WP3 (Figure 63) vise à quantifier les bilans de carbone continentaux et leur réponse à long terme aux changements d'occupation des sols à l'échelle européenne et mondiale, avec un accent particulier sur le rôle des flux de carbone dans les eaux continentales. Les objectifs spécifiques seront les suivants : **tâche T3.1**) reconstruire les changements d'occupation des terres dans les bassins versants de 15 sites pilotes, **tâche T3.2**) évaluer les effets à long terme des changements d'occupation des terres sur le cycle du carbone terrestre au cours des 5 000 dernières années à des échelles locales à mondiales, **tâche T3.3**) réévaluer les flux de carbone des eaux intérieures (émissions de CO₂ et de CH₄, enfouissement, exportation vers la côte) à l'échelle européenne et mondiale, tout en quantifiant la perturbation anthropique des flux.

Section 3.2 – Surveillance et Gestion des Écosystèmes Lacustres : Intégration des approches paléolimnologie-modèles dans les Observatoires pour une compréhension long-terme des lacs

Contexte, objectifs et motivation

- *Poursuite des développements initiés ces 5 dernières années avec les gestionnaires*
- *Besoin d'accompagnement des gestionnaires pour 1) suivre et comprendre l'évolution de la qualité des eaux, et 2) anticiper le devenir des lacs pour les prochaines décennies et ainsi anticiper certaines transformations liées au changement climatique*
- *Manque d'étude adressant l'évolution des services écosystémiques lacustres sur le long-terme, notamment à l'échelle des siècles, pourtant nécessaire pour inclure*

Poursuite des recherches en appui aux gestionnaires (volet opérationnel).

Ces études permettent d'étudier l'évolution décennale et/ou centennale de certaines variables fondamentales de la qualité des eaux des lacs comme la température, l'oxygène, la production primaire. Désormais, ces approches de modélisation nous permettent de produire des simulations pour des échelles de temps longues (plusieurs décennies et centaines d'années) et des métriques de qualité d'eau pour ces mêmes échelles temporelles, et ainsi consolider les approches de rétro-observation pour l'appui aux gestionnaires (e.g. Smol, 1992). De nouvelles recherches seront conduites pour intégrer et/ou améliorer la performance de certaines variables. On s'appuiera toujours dans ces études sur les "Ecological quality ratio" (EQR) (Figure 64, 65), mais en introduisant à l'avenir un état de « sans » perturbation anthropique correspondant à une référence historique identifiée grâce à la rétro-observation. La complémentarité est forte avec les archives sédimentaires car celles-ci nous donnent accès aux conditions de références passées avant les perturbations anthropiques, qu'il n'est pas possible d'avoir avec les chroniques de données limnologiques trop courtes. Trois conventions et rapports pour les gestionnaires des lacs mettent en évidence le potentiel opérationnel de ces approches modèles-archives, ce qui représente une nouvelle voie de recherche pour la paléolimnologie. Un papier de conceptualisation est en cours (Soares et Jenny).

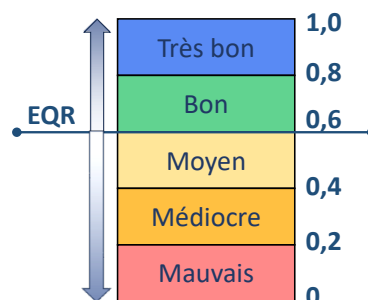


Figure 64. *Les classes de qualité standardisées selon le Ratio de Qualité Écologique (EQR) à destination des études pour les gestionnaires, ici dans le cas du rapport pour le SILA (Annecy).*

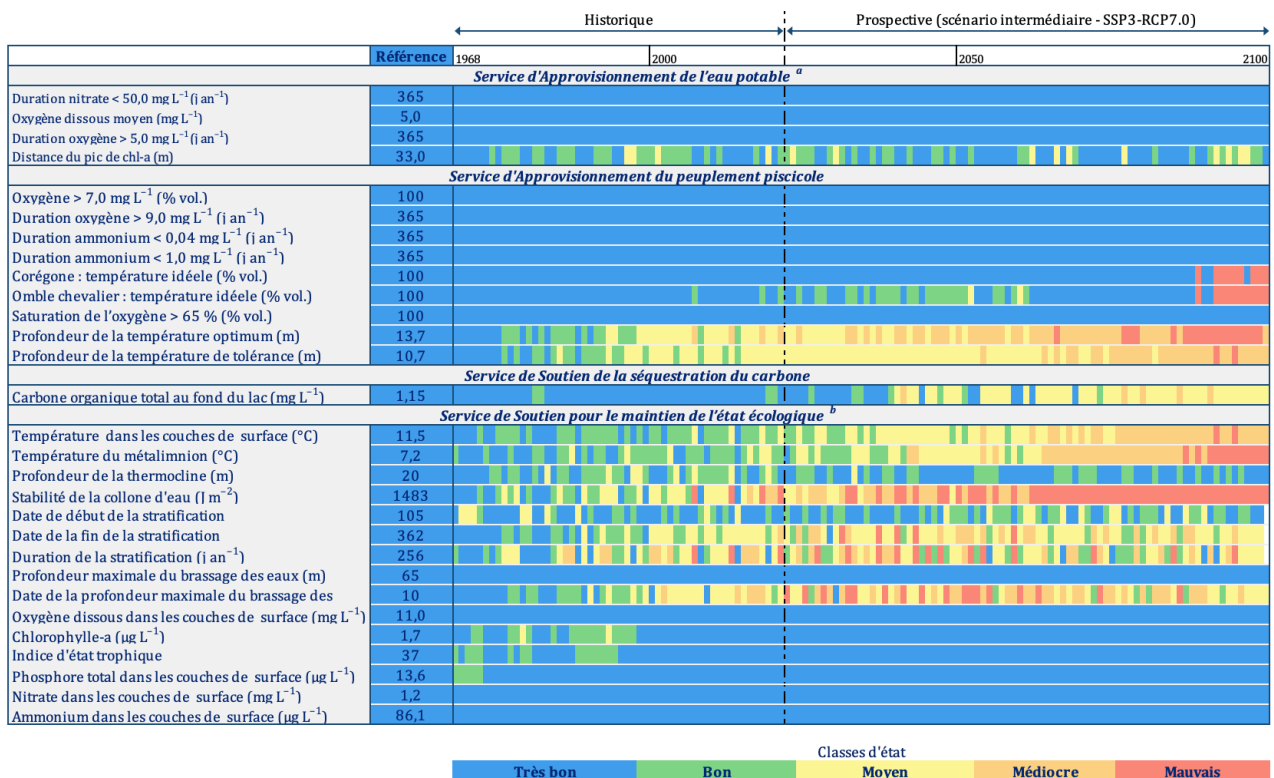


Figure 65. Synthèse des effets des changements climatiques sur le fonctionnement et services écosystémiques rendus par le lac d'Annecy en considérant le scénario intermédiaire (SSP3-RCP7.0), à destination des études pour les gestionnaires, ici dans le cas du rapport pour le SILA (Annecy), en cours de valorisation dans un article scientifique (Soares et al. in prep).

Perspectives spécifiques de développement d'assimilation modèles données à partir des lacs de l'observatoire OLA, avec finalité opérationnelle et fondamentale

- Consolider les modèles pour les 4 lacs de l'observatoire OLA
- Implémenter les groupes de phytoplancton dans le modèle AED
- Coupler AED aux modèles de bassin versant (type SWAT) pour les cycles CNP
- Encourager l'intégration de la modélisation couplée aux données paléoenvironnementales dans les observatoires lacustres
- Approfondir avec les experts la notion de services écosystémiques (SE)
- Mettre en œuvre l'approche pour la période de l'Holocène
- Faire émerger et formaliser de nouvelles questions scientifiques
- Améliorer les approches et conduire de nouvelles études pour les gestionnaires

Conclusion

Conclusion

Les activités de recherche développées ces dernières années se focalisent sur une compréhension approfondie des écosystèmes lacustres et leur rôle crucial dans le cycle du carbone. Les objectifs spécifiques se déclinent en trois axes majeurs couvrant l'estimation des stocks et des émissions de carbone, l'analyse des changements des conditions d'oxygène aux échelles temporelles centennale et millénaire, et aux changements de l'érosion des sols et des exports de carbone vers les plans d'eau. L'originalité des recherches repose sur l'intégration de données d'archives sédimentaires, de données d'observation issues de suivi et à la modélisation mécaniste des flux et stocks de carbone dans les écosystèmes lacustres, avec pour objectif de contribuer à améliorer notre compréhension de la séquestration et de l'émission de carbone dans ces environnements. En fin de compte, la démarche vise à combler les lacunes de connaissances actuelles, tout en fournissant des informations précieuses pour une gestion plus durable des ressources en eau douce et pour éclairer les politiques environnementales globales liées au changement climatique.

Références bibliographiques

Références

- Anderson, N. J., Heathcote, A. J., Engstrom, D. R., and Contributors, G. data: Anthropogenic alteration of nutrient supply increases the global freshwater carbon sink, *Science Advances*, 6, eaaw2145, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2145>, 2020.
- Ariztegui, Chondrogianni, C., Lami, A., Guilizzoni, P., and Lafargue, E.: Lacustrine organic matter and the Holocene paleoenvironmental record of Lake Albano (central Italy), *Journal of Paleolimnology*, 26, 283–292, 2001.
- Arnaud, F., Révillon, S., Debret, M., Revel, M., Chapron, E., Jacob, J., Giguët-Covex, C., Poulénard, J., and Magny, M.: Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology, *Quaternary Science Reviews*, 51, 81–92, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.07.025>, 2012.
- Arnaud, F., Poulénard, J., Giguët-Covex, C., Wilhelm, B., Révillon, S., Jenny, J.-P., Revel, M., Enters, D., Bajard, M., Fouinat, L., Doyen, E., Simonneau, A., Pignol, C., Chapron, E., Vannièrè, B., and Sabatier, P.: Erosion under climate and human pressures: An alpine lake sediment perspective, *Quaternary Science Reviews*, 152, 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.09.018>, 2016.
- Ask, J., Karlsson, J., Persson, L., Ask, P., Byström, P., and Jansson, M.: Terrestrial organic matter and light penetration: Effects on bacterial and primary production in lakes, *Limnology and Oceanography*, 54, 2034–2040, <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.2034>, 2009.
- Bajard, M., Poulénard, J., Sabatier, P., Develle, A.-L., Giguët-Covex, C., Jacob, J., Crouzet, C., David, F., Pignol, C., and Arnaud, F.: Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene, *CATENA*, 150, 39–52, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.001>, 2017.
- Bastviken, D., Cole, J., Pace, M., and Tranvik, L.: Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>, 2004.
- Bengtsson, L., Herschy, R. W., and Fairbridge, R. W. (Eds.): *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, Springer Netherlands, 2012.
- Bosson, J. B., Huss, M., Cauvy-Fraunié, S., Clément, J. C., Costes, G., Fischer, M., Poulénard, J., and Arthaud, F.: Future emergence of new ecosystems caused by glacial retreat, *Nature*, 620, 562–569, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06302-2>, 2023.
- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J. O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J., and Esper, J.: 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility, *Science*, 331, 578–582, <https://doi.org/10.1126/science.1197175>, 2011.
- Canadell, J. G., Ciais, P., Gurney, K., Le Quéré, C., Piao, S., Raupach, M. R., and Sabine, C. L.: An International Effort to Quantify Regional Carbon Fluxes, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92, 81–82, <https://doi.org/10.1029/2011EO100001>, 2011.
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M., Costa, M. H., Da Cunha, L. C., Cox, P. M., Alexey, V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., and Koven, C.: Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks, in: *IPCC AR6 WGI, Final Government Distribution*, 2021.
- Canuel, E. A. and Martens, C. S.: Seasonal variations in the sources and alteration of organic matter associated with recently-deposited sediments, *Organic Geochemistry*, 20, 563–577, [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90024-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90024-6), 1993.
- Carey, C. C.: Causes and consequences of changing oxygen availability in lakes: Kilham Plenary Lecture Article, *Inland Waters*, 13, 316–326, <https://doi.org/10.1080/20442041.2023.2239110>, 2023.

- Cole, J. J., Caraco, N. F., Kling, G. W., and Kratz, T. K.: Carbon Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes, *Science*, 265, 1568–1570, <https://doi.org/10.1126/science.265.5178.1568>, 1994.
- Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., Duarte, C. M., Kortelainen, P., Downing, J. A., Middelburg, J. J., and Melack, J.: Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget, *Ecosystems*, 10, 172–185, <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>, 2007.
- Desgué-Itier, O., Melo Vieira Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P.-A., Domaizon, I., Guillard, J., Mazure, T., Sharaf, N., Soullignac, F., Tran-Khac, V., Vinçon-Leite, B., and Jenny, J.-P.: Past and future climate change effects on thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes, *EGU sphere*, 1–34, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-260>, 2022.
- Desgué-Itier, O., Melo Vieira Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P. A., Domaizon, I., Guillard, J., Mazure, T., Sharaf, N., Soullignac, F., Tran-Khac, V., Vinçon-Leite, B., and Jenny, J.-P.: Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes, *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 837–859, <https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>, 2023.
- Dreßler, M., Hübener, T., Görs, S., Werner, P., and Selig, U.: Multi-proxy Reconstruction of Trophic State, Hypolimnetic Anoxia and Phototrophic Sulphur Bacteria Abundance in a Dimictic Lake in Northern Germany over the past 80 Years, *Journal of Paleolimnology*, 37, 205–219, <https://doi.org/10.1007/s10933-006-9013-x>, 2006.
- Driscoll, C. T., Fuller, R. D., and Schecher, W. D.: The role of organic acids in the acidification of surface waters in the Eastern U.S., *Water Air Soil Pollut*, 43, 21–40, <https://doi.org/10.1007/BF00175580>, 1989.
- Dubois, N., Saulnier-Talbot, É., Mills, K., Gell, P., Battarbee, R., Bennion, H., Chawchai, S., Dong, X., Francus, P., Flower, R., Gomes, D. F., Gregory-Eaves, I., Humane, S., Kattel, G., Jenny, J., Langdon, P., Massaferrero, J., McGowan, S., Mikomägi, A., Ngoc, N. T. M., Ratnayake, A. S., Reid, M., Rose, N., Saros, J., Schillereff, D., Tolotti, M., and Valero-Garcés, B.: First human impacts and responses of aquatic systems: A review of palaeolimnological records from around the world, *The Anthropocene Review*, 5, 28–68, <https://doi.org/10.1177/2053019617740365>, 2018.
- Espitalié, J., Deroo, G., and Marquis, F.: La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Deuxième partie., *Rev. Inst. Fr. Pét.*, 40, 755–784, <https://doi.org/10.2516/ogst:1985045>, 1985.
- Filippelli, G. M.: The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future, *Elements*, 4, 89–95, <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.2.89>, 2008.
- Francus: Image analysis Sediments and Paleoenvironments, 2004.
- Fry, B. and Sherr, E. B.: $\delta^{13}\text{C}$ Measurements as Indicators of Carbon Flow in Marine and Freshwater Ecosystems, in: *Stable Isotopes in Ecological Research*, New York, NY, 196–229, https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3498-2_12, 1989.
- Geer, G. de: Geochronology of the last 12,000 years, *Int Journ Earth Sciences*, 91, s100–s110, <https://doi.org/10.1007/s00531-002-0287-6>, 2002.
- Giguet-Covex, C.: Contribution des sédiments laminés lacustres à l'étude des changements environnementaux Holocène : approche couplée sédimentologique/géochimique à haute résolution : application à deux lacs nord-alpins, Thèse de doctorat, [s.n.], [S.l.], 335 pp., 2010.
- Heathcote, A. J., Filstrup, C. T., and Downing, J. A.: Watershed Sediment Losses to Lakes Accelerating Despite Agricultural Soil Conservation Efforts, *PLoS One*, 8, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053554>, 2013.
- Henry, D., Catalán, N., Obrador, B., and Marcé, R.: Modeling carbon burial along the land to ocean aquatic continuum: Current status, challenges and perspectives, *Earth-Science Reviews*, 253, 104791, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104791>, 2024.

- Hinderer, M., Kastowski, M., Kamelger, A., Bartolini, C., and Schlunegger, F.: River loads and modern denudation of the Alps – A review, *Earth-Science Reviews*, 118, 11–44, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.001>, 2013.
- Holgerson, M. A. and Raymond, P. A.: Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds, *Nature Geoscience*, 9, 222–226, <https://doi.org/10.1038/ngeo2654>, 2016.
- Hsü, K. J. and Kelts, K. R.: Freshwater carbonate sedimentation in lakes. *Chemistry, Geology, Physics*, A. Lerman ed., New-York. 295-323, 1978.
- IPCC: IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis (IPCC eds Stocker, T. F. et al.) (Cambridge Univ. Press 2013), 2013.
- Jacq, K., Giguët-Covex, C., Sabatier, P., Perrette, Y., Fanget, B., Coquin, D., Debret, M., and Arnaud, F.: High-resolution grain size distribution of sediment core with hyperspectral imaging, *Sedimentary Geology*, 393–394, 105536, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105536>, 2019.
- Jacq, K., Rapuc, W., Benoit, A., Coquin, D., Fanget, B., Perrette, Y., Sabatier, P., Wilhelm, B., Debret, M., and Arnaud, F.: Sedimentary structure discrimination with hyperspectral imaging in sediment cores, *Science of The Total Environment*, 817, 152018, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152018>, 2022.
- Jane, S. F., Hansen, G. J. A., Kraemer, B. M., Leavitt, P. R., Mincer, J. L., North, R. L., Pilla, R. M., Stetler, J. T., Williamson, C. E., Woolway, R. I., Arvola, L., Chandra, S., DeGasperi, C. L., Diemer, L., Dunalska, J., Erina, O., Flaim, G., Grossart, H.-P., Hambright, K. D., Hein, C., Hejzlar, J., Janus, L. L., Jenny, J.-P., Jones, J. R., Knoll, L. B., Leoni, B., Mackay, E., Matsuzaki, S.-I. S., McBride, C., Müller-Navarra, D. C., Paterson, A. M., Pierson, D., Rogora, M., Rusak, J. A., Sadro, S., Saulnier-Talbot, E., Schmid, M., Sommaruga, R., Thiery, W., Verburg, P., Weathers, K. C., Weyhenmeyer, G. A., Yokota, K., and Rose, K. C.: Widespread deoxygenation of temperate lakes, *Nature*, 594, 66–70, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>, 2021.
- 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., and Perga, M. E.: A spatiotemporal investigation of varved sediments highlights the dynamics of hypolimnetic hypoxia in a large hard-water lake over the last 150 years, , 1395–1408, 2013.
- Jenny, J.-P., Arnaud, F., Alric, B., Dorioz, J.-M., Sabatier, P., Meybeck, M., and Perga, M.-E.: Inherited hypoxia: A new challenge for reoligotrophicated lakes under global warming : Holocene hypoxia dynamics in large lakes, *Global Biogeochemical Cycles*, 28, 1413–1423, <https://doi.org/10.1002/2014gb004932>, 2014.
- Jenny, J.-P., Francus, P., Normandeau, A., Lapointe, F., Perga, M.-E., Ojala, A., Schimmelmänn, A., and Zolitschka, B.: Global spread of hypoxia in freshwater ecosystems during the last three centuries is caused by rising local human pressure, *Glob Chang Biol*, 22, 1481–1489, <https://doi.org/10.1111/gcb.13193>, 2016a.
- Jenny, J.-P., Normandeau, A., Francus, P., Taranu, Z. E., Gregory-Eaves, I., Lapointe, F., Jautzy, J., Ojala, A. E. K., Dorioz, J.-M., Schimmelmänn, A., and Zolitschka, B.: Urban point sources of nutrients were the leading cause for the historical spread of hypoxia across European lakes, *PNAS*, 113, 12655–12660, <https://doi.org/10.1073/pnas.1605480113>, 2016b.
- Jenny, J.-P., Koirala, S., Gregory-Eaves, I., Francus, P., Niemann, C., Ahrens, B., Brovkin, V., Baud, A., Ojala, A. E. K., Normandeau, A., Zolitschka, B., and Carvalhais, N.: Human and climate global-scale imprint on sediment transfer during the Holocene, *PNAS*, 201908179, <https://doi.org/10.1073/pnas.1908179116>, 2019.
- Jenny, J.-P., Koirala, S., Gregory-Eaves, I., Francus, P., Ahrens, B., Brovkin, V., Ojala, A. E. K., Zolitschka, B., Bader, J., and Carvalhais, N.: Reply to Li et al.: Human societies began to play a significant role in global sediment transfer 4,000 years ago, *PNAS*, <https://doi.org/10.1073/pnas.1922723117>, 2020.
- Kinnell, P. I. A.: Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review, *Journal of Hydrology*, 385, 384–397, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.024>, 2010.

- Lauerwald, R., Laruelle, G. G., Hartmann, J., Ciais, P., and Regnier, P. A. G.: Spatial patterns in CO₂ evasion from the global river network, *Global Biogeochemical Cycles*, 29, 534–554, <https://doi.org/10.1002/2014GB004941>, 2015.
- Lauerwald, R., Regnier, P., Camino-Serrano, M., Guenet, B., Guimberteau, M., Ducharne, A., Polcher, J., and Ciais, P.: ORCHILEAK (revision 3875): a new model branch to simulate carbon transfers along the terrestrial–aquatic continuum of the Amazon basin, *Geoscientific Model Development*, 10, 3821–3859, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3821-2017>, 2017.
- Lauerwald, R., Regnier, P., Guenet, B., Friedlingstein, P., and Ciais, P.: How Simulations of the Land Carbon Sink Are Biased by Ignoring Fluvial Carbon Transfers: A Case Study for the Amazon Basin, *One Earth*, 3, 226–236, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.009>, 2020.
- Lewis, S. L. and Maslin, M. A.: Defining the Anthropocene, *Nature*, 519, 171–180, <https://doi.org/10.1038/nature14258>, 2015.
- Li, Y., Shang, J., Zhang, C., Zhang, W., Niu, L., Wang, L., and Zhang, H.: The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review, *Science of The Total Environment*, 768, 144582, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144582>, 2021.
- Liu, S., Kuhn, C., Amatulli, G., Aho, K., Butman, D. E., Allen, G. H., Lin, P., Pan, M., Yamazaki, D., Brinkerhoff, C., Gleason, C., Xia, X., and Raymond, P. A.: The importance of hydrology in routing terrestrial carbon to the atmosphere via global streams and rivers, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, e2106322119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2106322119>, 2022.
- Lotter, A. F.: The palaeolimnology of Soppensee (Central Switzerland), as evidenced by diatom, pollen, and fossil-pigment analyses, *Journal of Paleolimnology*, 25, 65–79, 2001.
- Macdonald, R. W., Harner, T., and Fyfe, J.: Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data, *Sci Total Environ*, 342, 5–86, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.059>, 2005.
- Marcé, R., Gómez-Gener, L., and Carey, C. C.: Chapter 11 - Oxygen, in: *Wetzel's Limnology (Fourth Edition)*, edited by: Jones, I. D. and Smol, J. P., Academic Press, San Diego, 237–274, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822701-5.00011-2>, 2024.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., and Sillanpää, M.: Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 159, 189–197, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>, 2010.
- Mazure, T., Saulnier, G.-M., Giguet-Covex, C., Sabatier, P., Bajard, M., Chanudet, V., Arnaud, F., and Jenny, J.-P.: Half of the soil erosion in the Alps during the Holocene is explained by transient erosion crises as a consequence of rapid human land clearing, *The Holocene*, 09596836241254485, <https://doi.org/10.1177/09596836241254485>, 2024.
- MEEM: MEEM, 2016. Guide relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau), 2016.
- Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., and Schmitt, O.: Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach, *Nature Communications*, 7, 13603, <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>, 2016.
- Meyer-Jacob, C., Tolu, J., Bigler, C., Yang, H., and Bindler, R.: Early land use and centennial scale changes in lake-water organic carbon prior to contemporary monitoring, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 6579–6584, <https://doi.org/10.1073/pnas.1501505112>, 2015.
- Meyers, P. A.: Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter, *Chemical Geology*, 114, 289–302, [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0), 1994.

- Meyers, P. A.: Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes, *Organic Geochemistry*, 27, 213–250, [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00049-1), 1997.
- Mills, K., Vane, C. H., Lopes dos Santos, R. A., Ssemmanda, I., Leng, M. J., and Ryves, D. B.: Linking land and lake: Using novel geochemical techniques to understand biological response to environmental change, *Quaternary Science Reviews*, 202, 122–138, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.09.038>, 2018.
- Naipal, V., Reick, C., Pongratz, J., and Van Oost, K.: Improving the global applicability of the RUSLE model – adjustment of the topographical and rainfall erosivity factors, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2893–2913, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2893-2015>, 2015.
- Nakhavali, M., Friedlingstein, P., Lauerwald, R., Tang, J., Chadburn, S., Camino-Serrano, M., Guenet, B., Harper, A., Walmsley, D., Peichl, M., and Gielen, B.: Representation of dissolved organic carbon in the JULES land surface model (vn4.4_JULES-DOCM), *Geoscientific Model Development*, 11, 593–609, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-593-2018>, 2018.
- Nellemann, C. (Christian), Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L., and Grimsditch, G. D.: Blue carbon : the role of healthy oceans in binding carbon : a rapid response assessment, UNEP, 2009.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., and Alewell, C.: The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>, 2015.
- Perga, M.-E., Frossard, V., Jenny, J.-P., Alric, B., Arnaud, F., Berthon, V., Black, J., Domaizon, I., Giguët-Covex, C., Kirkham, A., Magny, M., Manca, M., Marchetto, A., Millet, L., Paillès, C., Pignol, C., Poulenard, J., Reyss, J.-L., Rimet, F., Sabatier, P., Savichtcheva, O., Sylvestre, F., and Verneaux, V.: High-resolution paleolimnology opens new management perspectives for lakes adaptation to climate warming, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 3, 72, <https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00072>, 2015.
- Prairie, Y. T., Alm, J., Beaulieu, J., Barros, N., Battin, T., Cole, J., del Giorgio, P., DelSontro, T., Guérin, F., Harby, A., Harrison, J., Mercier-Blais, S., Serça, D., Sobek, S., and Vachon, D.: Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs: What Does the Atmosphere See?, *Ecosystems*, 21, 1058–1071, <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0198-9>, 2018.
- Rapuc, W., Giguët-Covex, C., Bouchez, J., Sabatier, P., Gaillardet, J., Jacq, K., Genuite, K., Poulenard, J., Messenger, E., and Arnaud, F.: Human-triggered magnification of erosion rates in European Alps since the Bronze Age, *Nat Commun*, 15, 1246, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45123-3>, 2024.
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., Butman, D., Striegl, R., Mayorga, E., Humborg, C., Kortelainen, P., Dürr, H., Meybeck, M., Ciais, P., and Guth, P.: Global carbon dioxide emissions from inland waters, *Nature*, 503, 355–359, <https://doi.org/10.1038/nature12760>, 2013.
- Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P., Mackenzie, F. T., Gruber, N., Janssens, I. A., Laruelle, G. G., Lauerwald, R., Luysaert, S., Andersson, A. J., Arndt, S., Arnosti, C., Borges, A. V., Dale, A. W., Gallego-Sala, A., Goddérís, Y., Goossens, N., Hartmann, J., Heinze, C., Ilyina, T., Joos, F., LaRowe, D. E., Leifeld, J., Meysman, F. J. R., Munhoven, G., Raymond, P. A., Spahni, R., Suntharalingam, P., and Thullner, M.: Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean, *Nature Geosci*, 6, 597–607, <https://doi.org/10.1038/ngeo1830>, 2013a.
- Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P., Mackenzie, F. T., Gruber, N., Janssens, I. A., Laruelle, G. G., Lauerwald, R., Luysaert, S., Andersson, A. J., Arndt, S., Arnosti, C., Borges, A. V., Dale, A. W., Gallego-Sala, A., Goddérís, Y., Goossens, N., Hartmann, J., Heinze, C., Ilyina, T., Joos, F., LaRowe, D. E., Leifeld, J., Meysman, F. J. R., Munhoven, G., Raymond, P. A., Spahni, R., Suntharalingam, P., and Thullner, M.: Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean, *Nature Geosci*, 6, 597–607, <https://doi.org/10.1038/ngeo1830>, 2013b.
- Regnier, P., Resplandy, L., Najjar, R. G., and Ciais, P.: The land-to-ocean loops of the global carbon cycle, *Nature*, 603, 401–410, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04339-9>, 2022.

- Renard, K. G., Agricultural Research Service, W., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., and Yoder, D. C.: Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), 1997.
- Rinta, P., Bastviken, D., Schilder, J., Hardenbroek, M. van, Stötter, T., and Heiri, O.: Higher late summer methane emission from central than northern European lakes, *Journal of Limnology*, 76, <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1475>, 2017.
- Roychoudhury, A. N., Kostka, J. E., and Van Cappellen, P.: Pyritization: a palaeoenvironmental and redox proxy reevaluated, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 1183–1193, [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(03\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(03)00058-1), 2003.
- Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Watson, C. S., Kennedy, M. C., Bevington, A. R., Betts, R. A., Harrison, S., and Strattman, K.: Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990, *Nat. Clim. Chang.*, 10, 939–945, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>, 2020.
- Simonneau, A., Doyen, E., Chapron, E., Millet, L., Vannièrè, B., Di Giovanni, C., Bossard, N., Tachikawa, K., Bard, E., Albéric, P., Desmet, M., Roux, G., Lajeunesse, P., Berger, J. F., and Arnaud, F.: Holocene land-use evolution and associated soil erosion in the French Prealps inferred from Lake Paladru sediments and archaeological evidences, *Journal of Archaeological Science*, 40, 1636–1645, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.002>, 2013.
- Smol, J. P.: Paleolimnology: an important tool for effective ecosystem management, *J Aquat Ecosyst Stress Recov*, 1, 49–58, <https://doi.org/10.1007/BF00044408>, 1992.
- Smol, J. P.: The power of the past: using sediments to track the effects of multiple stressors on lake ecosystems, *Freshwater Biology*, 55, 43–59, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02373.x>, 2010.
- Smol, J. P., Birks, H. J. B., and Last, W. M. (Eds.): *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*, Springer Netherlands, Dordrecht, <https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1>, 2001.
- Talbot, M. R. and Lærdal, T.: The Late Pleistocene - Holocene palaeolimnology of Lake Victoria, East Africa, based upon elemental and isotopic analyses of sedimentary organic matter, *Journal of Paleolimnology*, 23, 141–164, <https://doi.org/10.1023/A:1008029400463>, 2000.
- Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J., Dillon, P., Finlay, K., Fortino, K., and Knoll, L. B.: Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate, *Limnology and Oceanography*, 54, 2298–2314, https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298, 2009.
- Tranvik, L. J., Cole, J. J., and Prairie, Y. T.: The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle, *Limnology and Oceanography Letters*, 3, 41–48, <https://doi.org/10.1002/lo2.10068>, 2018.
- Tribouillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., and Riboulleau, A.: Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update, *Chemical Geology*, 232, 12–32, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>, 2006.
- Tyson, R. V.: *Sedimentary Organic Matter*, Springer Netherlands, Dordrecht, <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0739-6>, 1995.
- Van, D. B. W. and Solimini, A.: *Ecological Quality Ratios for Ecological Quality Assessment in Inland and Marine Waters*. EUR 22722 EN. 2007. JRC36757, 2007.
- Van Oost, K., Quine, T. A., Govers, G., De Gryze, S., Six, J., Harden, J. W., Ritchie, J. C., McCarty, G. W., Heckrath, G., Kosmas, C., Giraldez, J. V., da Silva, J. R. M., and Merckx, R.: The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle, *Science*, 318, 626–629, <https://doi.org/10.1126/science.1145724>, 2007.
- Wetzel, R. G.: *Limnology: Lake and River Ecosystems*, Academic Press, 1024 pp., 2001.

Worrall, F., Harriman, R., Evans, C. D., Watts, C. D., Adamson, J., Neal, C., Tipping, E., Burt, T., Grieve, I., Monteith, D., Naden, P. S., Nisbet, T., Reynolds, B., and Stevens, P.: Trends in Dissolved Organic Carbon in UK Rivers and Lakes, *Biogeochemistry*, 70, 369–402, <https://doi.org/10.1007/s10533-004-8131-7>, 2004.

Zinke, L.: The colours of carbon, *Nat Rev Earth Environ*, 1, 141–141, <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0037-y>, 2020.

Zolitschka, B.: Dating based on freshwater and marine laminated sediments, Mackay A, Battarbee R, Birks J, Oldfield F (eds) *Global change in the Holocene*. Edward Arnold Publishers, London, pp 92–106, 2003.