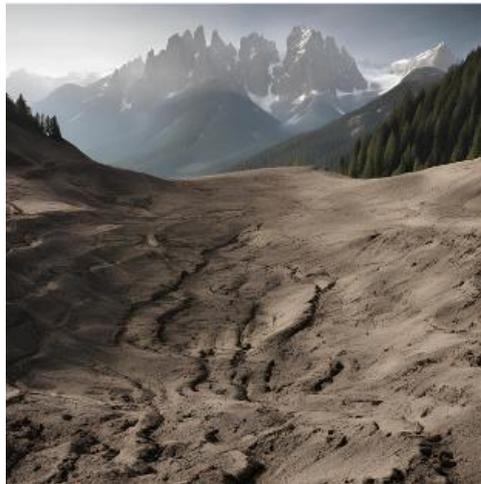


Évaluation quantitative de l'effet des activités humaines et du climat sur l'érosion de la Zone Critique alpine au cours des 2000 dernières années



Réalisée sous IA, canva

William Rapuc¹ (chercheur) et la classe de 3^{ème} C du collège Olympe de Gougues de Mme Laetitia Legrand² (*la liste des élèves est aussi mentionnée en fin d'article*)

Article original/Original article: Rapuc, William, Julien Bouchez, Pierre Sabatier, Kim Genuite, Jérôme Poulernard, Jérôme Gaillardet, et Fabien Arnaud. « Quantitative evaluation of human and climate forcing on erosion in the alpine Critical Zone over the last 2000 years ». *Quaternary Science Reviews* 268 (15 septembre 2021): 107127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107127>.

Institution : ¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

² Collège Olympe de Gougues de Cadaujac, 250 Chemin du château, 33140 Cadaujac

Résumé :

L'érosion correspond à l'ensemble des processus externes qui, à la surface de la Terre, vont retirer des éléments existants (minéraux, ions, ...) et ainsi modifier le relief. En modifiant la surface de la Terre, et par conséquent les sols, c'est tout l'équilibre environnemental qui est impacté. En effet, les sols, fortement impactés par les activités humaines et le changement climatique sont nécessaires à l'Homme pour sa survie, ses activités.

Qui de l'action humaine ou du climat prédomine dans cette érosion ? Il est important de le savoir, de pouvoir le quantifier dans un contexte de plus en plus marqué par le changement climatique mais aussi par les activités humaines impactant les sols (agriculture intensive,

1

Article en accès libre sous licence Creative Commons (CCAL) : cet article est en téléchargement et diffusion libre sans but commercial ni modification et doit être cité comme mentionné en fin d'article ou sur le site du journal.

Free access article under Creative Commons licence: this article can be downloaded and shared without any commercial purpose and cannot be modified. It must be cited as mentioned at the end of the article or in the journal website.



déforestation, ...). C'est pourquoi, nous nous intéressons à cette zone critique, environnement hétérogène, fragile et proche de la surface où des interactions complexes impliquant la roche, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants régulent l'habitat naturel et déterminent la disponibilité des ressources biologiques.

Les zones montagneuses sont les zones les plus sujettes à l'érosion. Dans ces zones, il est ainsi nécessaire d'utiliser des études à grande échelle spatiale et temporelle pour déterminer le rôle de ces différents forçages et estimer leurs parts respectives dans l'érosion.

C'est ce que propose cette étude. Pour reconstruire l'érosion à long terme sur le bassin versant du lac Iséo, l'un des grands des Alpes européennes, les sédiments du lac Iséo ont été étudiés. Ce lac collecte, en effet, les produits de l'érosion de ce bassin versant de 1777 km².

Pourquoi ce choix du lac Iséo ? Car d'une part, le bassin versant d'où proviennent les sédiments étudiés, est représentatif des Alpes italiennes méridionales, où l'activité humaine et les fluctuations climatiques de l'Holocène sont bien connues. Mais aussi car dans ce bassin-versant, les sédiments proviennent de trois types principaux de roches et qu'il est possible de faire la part entre leurs différentes origines. Certains proviennent de la zone de haute altitude du bassin versant d'Iseo, où les avancées et les reculs des glaciers sont la seule cause d'érosion. D'autres sont issus de la partie inférieure du bassin versant, où cette fois l'érosion est influencée au cours du temps à la fois par les activités humaines et les précipitations.

Cette méthode associe la géochimie isotopique (ϵNd , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) selon une méthode source-puits à une analyse multi-proxy des sédiments lacustres sur une période de 2000 ans.

Une analyse multi-proxy est une approche permettant d'étudier les changements passés dans les systèmes naturels. Dans cette approche, plusieurs types de données ou de "proxies" sont utilisés pour reconstruire les conditions environnementales passées. Ces proxies peuvent inclure des éléments tels que des isotopes, des marqueurs chimiques, des fossiles, des données géomorphologiques, des données climatiques, etc.

Ici, on observe que, selon la provenance des sédiments (zone haute ou basse du bassin versant), les signatures isotopiques ne seront pas les mêmes. Ceci a tout d'abord permis de reconstituer l'histoire de l'érosion glaciaire sur les 2000 dernières années. Après avoir évalué l'évolution climatique, c'est le processus d'érosion des roches sédimentaires qui a été étudié pour comprendre l'impact des activités humaines.

Grâce à de nombreuses archives provenant d'études précédentes, nous avons pu apprendre que, de la période romaine à l'ère industrielle, plusieurs périodes de déforestation et de pression humaine importante ont existé dans la région. Il ressort ainsi, que la charge sédimentaire passée provenant de la zone des roches sédimentaires, présente les valeurs les plus élevées ($> 80 \text{ t.km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) lors des périodes de pratiques humaines intenses.

Depuis la fin de l'ère romaine, les activités humaines semblent ainsi être le principal moteur de l'érosion physique dans les régions montagneuses du nord de l'Italie. Cette étude représente la première tentative de reconstitution temporelle de l'évolution de l'érosion à partir de sédiments lacustres, en identifiant les sources de ces sédiments et en évaluant quantitativement les facteurs d'érosion dans la zone critique.

Mots clés : Érosion, Impact des activités humaine, sédiments de lac, approche source-puits, modèle de mélange isotopique



I Introduction

L'érosion, au fil du temps, affecte, par exemple, le relief, mais aussi le climat de la Terre, faisant de ce processus un élément géologique significatif. (e.g., (Gayer et al., 2019) et les références qui s'y trouvent).

L'érosion est le facteur numéro un de la dégradation de la zone critique. La zone critique pouvant être définie comme étant cet environnement hétérogène, fragile et proche de la surface où des interactions complexes impliquant la roche, le sol, l'eau, l'air et les organismes vivants régulent l'habitat naturel et déterminent la disponibilité des ressources biologiques.

Parmi ses nombreux effets, l'érosion dégrade les sols. Cela a des répercussions sur la production alimentaire, la qualité de l'eau potable, les services écosystémiques, la biodiversité et les réserves de carbone du sol (e.g., (Bosco et al., 2008; Panagos et al., 2015)). En effet, les sols constituent le puits de CO₂ le plus efficace à la surface de la Terre.

En raison de ses multiples impacts et de la menace que cela fait peser sur nos sociétés, les Nations Unies et l'Europe ont décidé de demander une évaluation quantitative de la perte de sol sur de grandes échelles spatiales et temporelles (e.g., (Panagos et al., 2015) et les références qui s'y trouvent).

Pourquoi une telle demande ? Parce qu'il est primordial de mieux comprendre les effets des principaux facteurs qui influent sur l'érosion. En particulier, le climat (comme les précipitations et les mouvements des glaciers) et les activités humaines (comme l'exploitation des sols et la gestion des forêts) qui ont été identifiés comme des facteurs clés dans les changements à long terme des taux d'érosion (e.g., (Panagos et al., 2015)).

Comment progresser et acquérir de nouvelles connaissances pour mieux appréhender ces phénomènes ? Plusieurs

approches sont possibles : d'une part les modélisations mais aussi l'étude des archives disponibles. Et parmi ces archives, nous avons celles constituées par les sédiments lacustres. En effet, les sédiments lacustres sont utiles, notamment pour évaluer les taux d'érosion sur des échelles de temps centenaires à millénaires, où les influences climatiques et humaines sont les plus probables en tant que moteurs de l'érosion.

A ces échelles de temps, nous disposons de synthèses régionales en particulier pour les Alpes européennes (e.g., (Hinderer et al., 2013) et les références qui s'y trouvent), mais il existe seulement quelques études ayant produit une évaluation quantitative des taux d'érosion dans le temps (e.g., (Bajard et al., 2020)), et aucune n'ayant permis de quantifier l'effet des différents facteurs.

L'approche "source-puits" (e.g., (Collins & Walling, 2002)) permet de tracer l'origine des sédiments provenant de différentes zones géographiques ou types de roches vers une destination, comme un lac, au fil du temps. On les suit ainsi de la source (provenance) vers le puits (destination finale). Cela permet de mieux comprendre l'impact du climat et des activités humaines sur l'érosion, à condition que chaque source de sédiments soit impactée par les différents facteurs de manière distincte.

Pour cette étude, nous avons choisi le lac Iseo, dans les Alpes italiennes, à l'aval de la vallée du Val Camonica, une région où les activités humaines depuis le début de l'ère néolithique sont bien enregistrées (e.g., Pini et al., 2016 et les références citées). Le lac Iseo reçoit les eaux d'un grand bassin versant qui peut être subdivisé en trois principales sources de sédiments, identifiables grâce à des outils géochimiques. Ces sources correspondent aux différents impacts relatifs des influences climatiques et humaines sur l'érosion sur des

échelles temporelles allant du siècle au millénaire.

Ainsi :

- (i) La partie au Nord-Est et de haute altitude du bassin versant, où ce sont l'impact des glaciers qui domine l'érosion avec de nombreux glaciers ayant façonné le paysage (Scotti et al., 2013);
- (ii) La partie du bassin versant située à moyenne altitude où l'érosion est mixte, les glaciers et les activités humaines ont eu un impact sur l'érosion (Pini et al., 2016; Scotti et al., 2013);

(iii) La partie la plus au sud, de faible à moyenne altitude, du bassin versant, qui est le siège de la plupart des activités humaines dans le Val Camonica depuis le début de l'Holocène tardif (Pini et al., 2016 et les références citées).

Nous avons étudié comment l'érosion a évolué dans le bassin du lac Iseo à la fin de l'Holocène. Pour ce faire, nous avons analysé des échantillons de sédiments prélevés dans le fond du lac, où la plupart des sédiments provenant du bassin versant sont accumulés (le puits par conséquent).

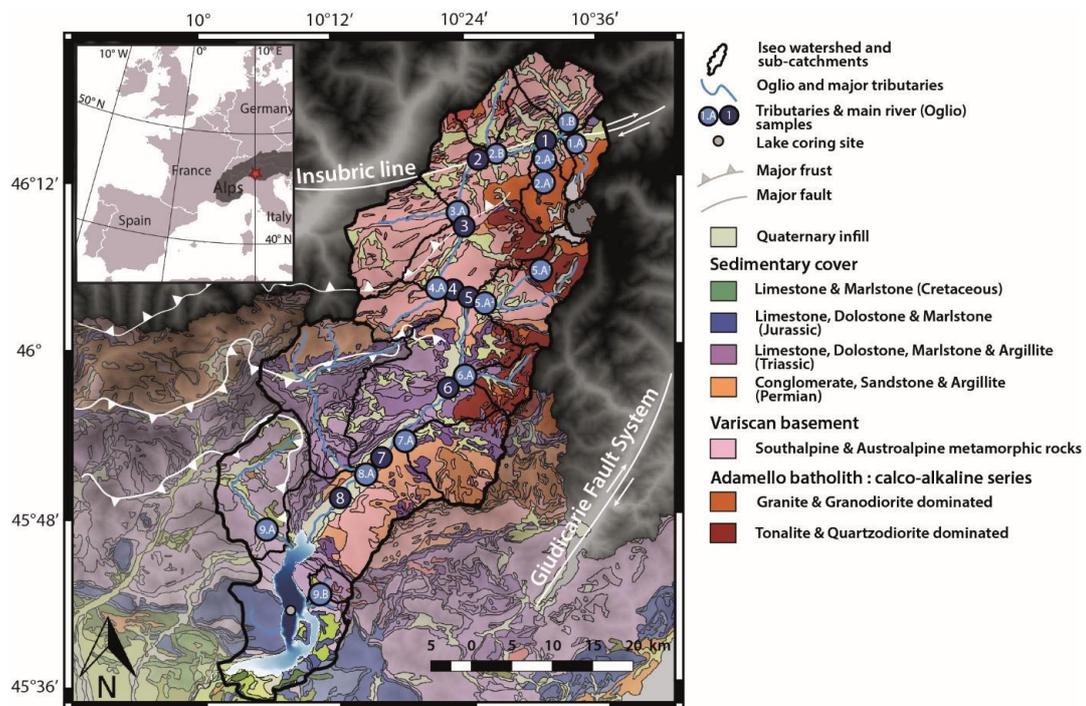


Figure 1 - Carte géologique de la zone d'étude, superposée à une carte en relief ombrée, et emplacement des sites d'échantillonnage. Les informations géologiques ont été modifiées à partir de la carte géologique de la Lombardie (projet CARG ; <https://www.cartografia.servizirl.it/cargviewer/>). Les affluents (en bleu) et les sous-bassins versants (limites en noir) de la rivière Oglio et le site de carottage des sédiments du lac SEB18 sont également représentés (cercle gris). La bathymétrie du lac Iseo est modifiée à partir de (Pilotti et al., 2013) et est disponible sur https://hydraulics.unibs.it/hydraulics/attivita-scientifica/laghi_pvbs/lake-iseo-data-set/. (Rapuc et al., 2021)



Nous avons également collecté des échantillons de rivières dans tous les sous-bassins versants qui alimentent directement le lac d'Iseo. En utilisant les compositions isotopiques du néodyme (Nd) et du strontium (Sr) ainsi que les concentrations de sédiments dans les rivières et le lac, nous avons utilisé un modèle de mélange pour comprendre la provenance des sédiments.

Ces résultats nous ont permis de quantifier la contribution de chaque source de sédiments, nous aidant ainsi à comprendre comment les variations climatiques et les activités humaines ont influencé l'érosion dans le bassin du lac Iseo depuis l'époque romaine jusqu'à aujourd'hui.

II Site d'étude

Le lac Iseo se trouve dans les Alpes italiennes, au sud de la vallée du Val Camonica, à une altitude de 185 mètres. Il mesure environ 25 kilomètres de long et couvre une superficie de près de 61 kilomètres carrés. Son principal affluent est la rivière Oglio, qui prend sa source dans le massif de l'Adamello.

Le bassin versant de l'Oglio, qui alimente le lac, est vaste, couvrant environ 1777 kilomètres carrés. Il présente une topographie montagneuse, avec une altitude maximale de 3539 mètres dans le massif de l'Adamello et une altitude moyenne de 1400 mètres (Garibaldi et al., 1999). (Fig. 1).

Les roches qui composent ce bassin versant varient, avec des formations métamorphiques au nord et à l'ouest, des roches sédimentaires au sud, et le massif de l'Adamello au nord-est, composé principalement de roches plutoniques (Chiesa et al., 2011 ; (Gosso et al., 2012).

En ce qui concerne l'occupation humaine, les activités humaines sont concentrées principalement près du lac, à des altitudes

basses à moyennes, avec des preuves d'implantations humaines remontant au Néolithique. Les activités agricoles et urbaines sont principalement concentrées dans cette région (e.g., (Marziani & Citterio, 1999; Pini, 2002; Pini et al., 2016). Dans les parties plus éloignées du bassin versant, telles que les régions montagneuses, les activités humaines sont moins importantes et se limitent principalement au pâturage du bétail (Pini et al., 2016).

III Matériels et Méthodes :

1 Les sédiments de lac :

En octobre 2018, a été prélevée une longue carotte de sédiments, appelée "SEB18", dans le fond profond du lac d'Iseo en Italie. Ce site a été choisi car il est moins perturbé par des événements soudains (crues et séismes) et recueille régulièrement les sédiments venant de la rivière Oglio (Bini et al., 2007).

Pour étudier ces sédiments, des équipements spéciaux ont été utilisés et nous avons pris des échantillons à différentes profondeurs. Nous avons ainsi prélevé trente échantillons de boue de 1 cm de long pour des analyses géochimiques. A également été mesurée la densité apparente sèche des sédiments et la proportion de silicates détritiques a aussi été évaluée. Pour dater avec précision la séquence de sédiment, nous avons combiné plusieurs méthodes, comme le comptage des varves avec la mesure des éléments radioactifs avec l'utilisation de radionucléides à courte durée de vie et le carbone 14.

Mais avant d'aller plus loin, quelques explications s'imposent. Le comptage des varves ? En quoi cela consiste-t-il ?

Le comptage des varves est une méthode utilisée pour estimer l'âge des sédiments lacustres ou glaciaires en comptant les couches de sédiments annuelles visibles dans



une carotte par exemple. Une varve est une fine couche de sédiments qui se dépose chaque année dans un environnement lacustre ou glaciaire. Elle est généralement composée de dépôts de matériaux fins comme la boue, l'argile ou le limon.

Ces varves se forment généralement en raison des variations saisonnières dans le processus de sédimentation. Par exemple, en été, lorsque la fonte des neiges et des glaciers augmente le débit des rivières, une plus grande quantité de sédiments est transportée vers le lac, ce qui conduit à la formation d'une varve plus épaisse. En revanche, en hiver, lorsque le débit des rivières diminue, la sédimentation est moins importante et une varve plus mince se forme. Notons que la couleur des varves peut aussi varier en fonction de la composition du sédiment, de sa richesse en matière organique, etc.

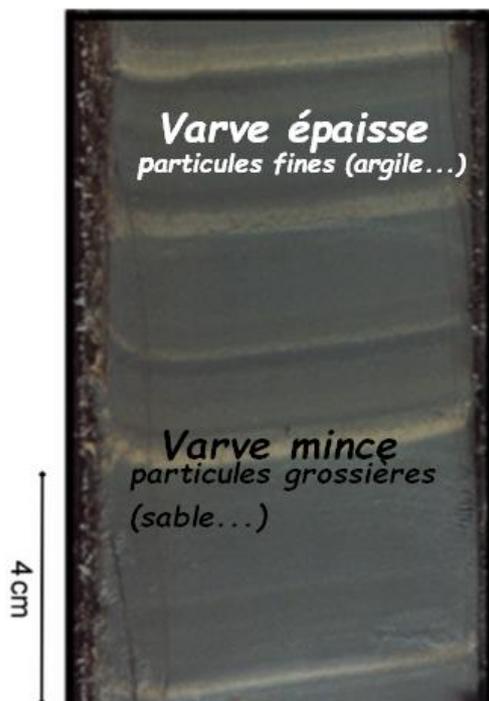


Fig 2 : exemple de varves d'une carotte prélevée dans le lac d'Annecy. D'après J.F. Deconinck 2016, *Paléoclimats : l'enregistrement des variations climatiques*.

En comptant le nombre de varves dans une séquence de sédiments, les scientifiques peuvent estimer l'âge de ces dépôts avec une certaine précision. Cette méthode permet ainsi de reconstruire l'histoire environnementale d'un site donné sur de longues périodes de temps, souvent sur des milliers d'années.

Quant à l'utilisation des isotopes radioactifs dont il sera souvent question dans la suite de cet article, cela consiste à détecter et à quantifier la présence de certains isotopes radioactifs dans les échantillons de sédiments ou de matériaux environnementaux. Les radionucléides à courte durée de vie sont des isotopes radioactifs qui se désintègrent rapidement en émettant des rayonnements, ce qui leur confère une courte demi-vie.

En mesurant la quantité de ces radionucléides dans les couches de sédiments, les scientifiques peuvent estimer l'âge des dépôts et reconstruire l'histoire environnementale du site étudié. Les radionucléides à courte durée de vie servent de marqueurs temporels pour établir une chronologie des événements passés, complétant ainsi d'autres méthodes de datation comme le comptage des varves ou l'analyse du carbone 14.

Grâce à toutes ces analyses, il est possible de reconstituer l'histoire environnementale du lac sur une longue période de temps.

2 Sédiments de rivière :

Pour comprendre d'où viennent les sédiments accumulés au fond du lac Iseo, des échantillons de sédiments ont été collectés en mai 2018. Ces échantillons ont été prélevés dans les zones où les rivières qui alimentent directement le lac se rejoignent avec la rivière principale, appelée l'Oglio, en amont de la confluence (Fig. 1). D'autres échantillons ont également été collectés un peu plus en aval de



ces points de jonction pour voir comment les sédiments se mélangent entre les différentes zones. Ainsi, la majorité des affluents ont été échantillonnés.

Pour cette collecte, il s'agit de prendre des échantillons de sédiments fins des zones de crue des rivières et de les passer à travers un tamis pour ne garder que la partie la plus fine (<63 µm). Cela était nécessaire car les sédiments dans le lac sont principalement constitués de limon et d'argile. Ces échantillons serviront à déterminer d'où viennent les sédiments qui se trouvent au fond du lac Iseo.

3 Préparation des échantillons :

Dans les régions où les sols sont principalement composés de carbonates, l'érosion est difficile à mesurer. Pour mieux étudier ce processus, l'étude s'est concentrée sur les matériaux silico-clastiques et la partie carbonatée des sédiments lacustres et fluviaux a été éliminée avant les analyses géochimiques (Ramisch et al., 1999). Cela garantit que les carbonates présents dans le lac n'influencent pas les conclusions.

Pour ce faire, il faut d'abord broyer les échantillons de sédiments et les sécher. Ensuite, il faut retirer les carbonates en les traitant avec de l'acide chlorhydrique (HCl). L'acide chlorhydrique a la particularité d'attaquer les carbonates, de les dissoudre. Puis a été mesurée la quantité de calcium (Ca) et de strontium (Sr) perdus lors de ce processus. Cependant, il est important de noter que cette méthode n'a pas pu éliminer complètement les carbonates, ce qui peut être dû à la présence de dolomite dans les sédiments.

A également été conservée une série d'échantillons de sédiments sans traitement acide pour mesurer les isotopes et les

concentrations en éléments majeurs et traces. Tous les échantillons, qu'ils aient été traités ou non, ont ensuite été dissous digérés à l'aide de mélanges d'acides concentrés pour pouvoir effectuer les analyses nécessaires.

4 Eléments majeurs et traces

Tout d'abord que sont les éléments majeurs et traces ?

Les éléments majeurs et traces sont des catégories utilisées en géochimie pour classer les éléments en fonction de leur abondance relative dans les roches, les minéraux...

Les éléments majeurs sont présents en quantités relativement élevées dans les échantillons géologiques et comprennent des éléments tels que l'oxygène (O), le silicium (Si), l'aluminium (Al), le fer (Fe), le calcium (Ca), le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le titane (Ti).

Ils sont souvent les principaux constituants des minéraux et des roches.

Quant aux éléments traces, ils sont présents en quantités beaucoup plus faibles dans les échantillons géologiques, généralement en parties par million (ppm) ou en parties par milliard (ppb).

Les éléments traces incluent des éléments tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le vanadium (V), le chrome (Cr), l'argent (Ag), le baryum (Ba), le strontium (Sr), le néodyme (Nd), etc.

Bien qu'ils soient présents en quantités infimes, ils jouent souvent des rôles importants dans la géologie, l'hydrologie, la métallurgie, et sont également utilisés comme indicateurs de processus géologiques et environnementaux.

Comment les a-t-on mesurés dans cette étude ? Pour mesurer les concentrations des éléments majeurs et des traces, un instrument appelé ICP-MS Agilent 7900, a été utilisé. Il





est capable de détecter des éléments présents en très petites quantités. Les échantillons liquides ont été transformés en fines particules puis vaporisés. Ensuite, ils ont été ionisés pour pouvoir être analysés.

Des éléments tels que le magnésium (Mg), le calcium (Ca) et le fer (Fe) ont été mesurés, en utilisant une méthode qui élimine les interférences qui pourraient fausser les résultats. Pour d'autres éléments comme le néodyme (Nd) et le strontium (Sr), il n'a pas été utile d'employer cette méthode spécifique.

Pour assurer la précision des mesures, des étalons sont utilisés. Ce sont des échantillons de référence de composition connue. A plusieurs reprises un échantillon de sol de référence a été également mesuré pour évaluer la justesse des mesures.

Les résultats ont été exprimés en prenant en compte la perte de poids due à l'élimination des carbonates des sédiments, de sorte que les concentrations rapportées se réfèrent uniquement à la partie silicatée des échantillons. Cela a permis d'obtenir des données précises sur les éléments présents dans les sédiments.

5 Composition isotopique

Pour comprendre la provenance des sédiments dans le bassin profond du lac Iseo, des mesures isotopiques ont été effectuées, à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). Les éléments strontium (Sr) et néodyme (Nd) ont été séparés de la matrice de l'échantillon à l'aide d'une technique appelée chromatographie d'extraction (Hajj et al., 2017).

Ensuite, avec un appareil appelé spectromètre de masse à plasma inductif multi-collecteur (MC-ICPMS) ont été mesurés les rapports isotopiques du Sr. Ce processus a nécessité des corrections pour éliminer les interférences de certains

éléments, comme le rubidium (Rb) et le krypton (Kr), qui peuvent fausser les résultats. L'exactitude des mesures a aussi été vérifiée en comparant les résultats avec des échantillons de référence de composition connue.

Pour les isotopes du néodyme, le MC-ICPMS a aussi été utilisé pour mesurer les rapports isotopiques. Les résultats ont été présentés sous forme de valeurs ϵ_{Nd} pour faciliter l'analyse. Encore une fois, l'exactitude des mesures a été vérifiée en les comparant avec des échantillons de référence (Caro et al., 2006).

Ces mesures isotopiques ont permis de mieux comprendre l'origine des sédiments dans le lac Iseo et d'évaluer leur composition de manière précise.

IV Résultats et interprétations

1 Sédiments de lacs :

Dans la séquence sédimentaire SEB18 du lac Iseo, la sédimentation continue représente près de 40% de l'accumulation totale de sédiments. Ces sédiments se composent principalement d'argile grise, qui se distingue visuellement des couches causées par des crues ou des séismes. Sur les 15,5 mètres de sédiments, on a identifié 146 de ces couches événementielles, qui représentent environ 60% des sédiments. La majorité des sédiments du bassin profond du lac Iseo sont des silicates détritiques, avec une faible quantité de matière organique et de carbonates.

Pour comprendre l'âge des différentes couches de sédiments, plusieurs méthodes ont été combinées, notamment le comptage de varves, les radionucléides à courte durée de vie et les datations au carbone 14. Ces techniques ont permis de retracer les variations de taux de sédimentation au fil des 2000 ans couverts par cette séquence



sédimentaire. Par exemple, il est possible d'identifier trois périodes d'augmentation progressive du taux de sédimentation entre 500 et 800 de notre Ere, entre 1000 et 1400 de notre Ere, et à partir de 1500 jusqu'à nos jours.

En ce qui concerne les isotopes du strontium (Sr) et du néodyme (Nd) dans les sédiments silico-clastiques du lac Iseo, on constate des variations significatives au fil du

temps. Le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a montré une augmentation marquée entre 97 et 1033 de notre Ere, suivie d'une diminution jusqu'à 1265 de notre Ere, puis des fluctuations relativement élevées jusqu'à aujourd'hui. Les valeurs de ϵNd sont restées relativement constantes, sauf pour deux périodes où elles ont présenté des variations significatives (Fig. 3).

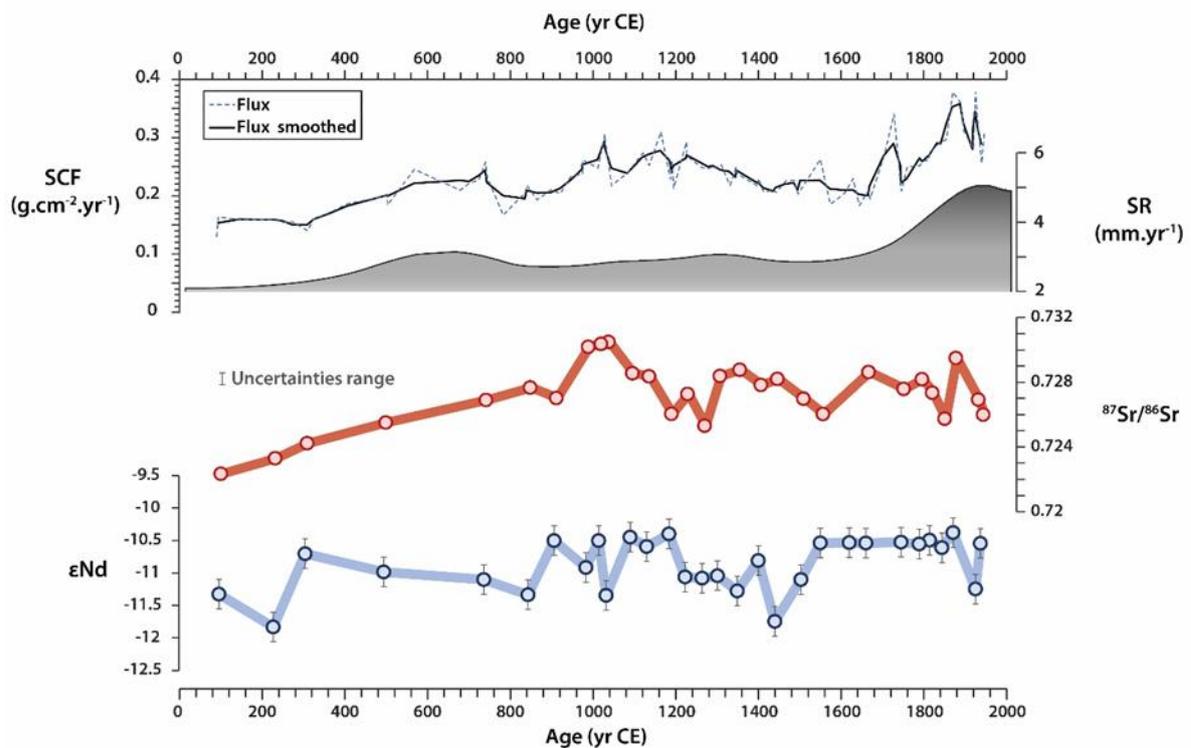


Figure 3 - Flux détritique de silicate (SCF, pour le flux silico clastique), taux de sédimentation (SR) et rapports isotopiques Sr et Nd du lac d'Iseo au cours des 2000 dernières années, obtenus à partir de la séquence de sédiments lacustres SEB18. Le flux silico clastique a été obtenu à partir d'analyses de la perte au feu, de la modélisation âge-profondeur et de mesures de la densité (supplément S1). Le taux de sédimentation a été obtenu à partir du modèle âge-profondeur (supplément S5). Les barres d'erreur sur les courbes $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et ϵNd représentent les intervalles de confiance à 95% correspondant à l'incertitude analytique.

En résumé, l'analyse des sédiments du lac Iseo permet de reconstruire l'histoire environnementale de la région sur les 2000 dernières années, en mettant en évidence les changements dans la sédimentation et les variations isotopiques qui reflètent les processus géologiques et environnementaux survenus dans la région (Rapuc et al., 2021)

2 Sédiments de rivières :

Les sédiments prélevés dans les sous-bassins versants de l'Oglio présentent une variété de compositions isotopiques, indiquant une diversité de sources géologiques.

Les échantillons des bassins septentrionaux, qui sont principalement constitués de roches calco-alcalines comme

les tonalites et les granites, montrent des valeurs ϵ_{Nd} plus radiogéniques, reflétant leur origine dans des roches plus jeunes et riches en éléments radioactifs.

En revanche, les sous-bassins versants méridionaux, qui drainent des roches sédimentaires et métamorphiques, présentent des valeurs ϵ_{Nd} moins radiogéniques, indiquant une origine à partir de roches plus anciennes et moins radioactives.

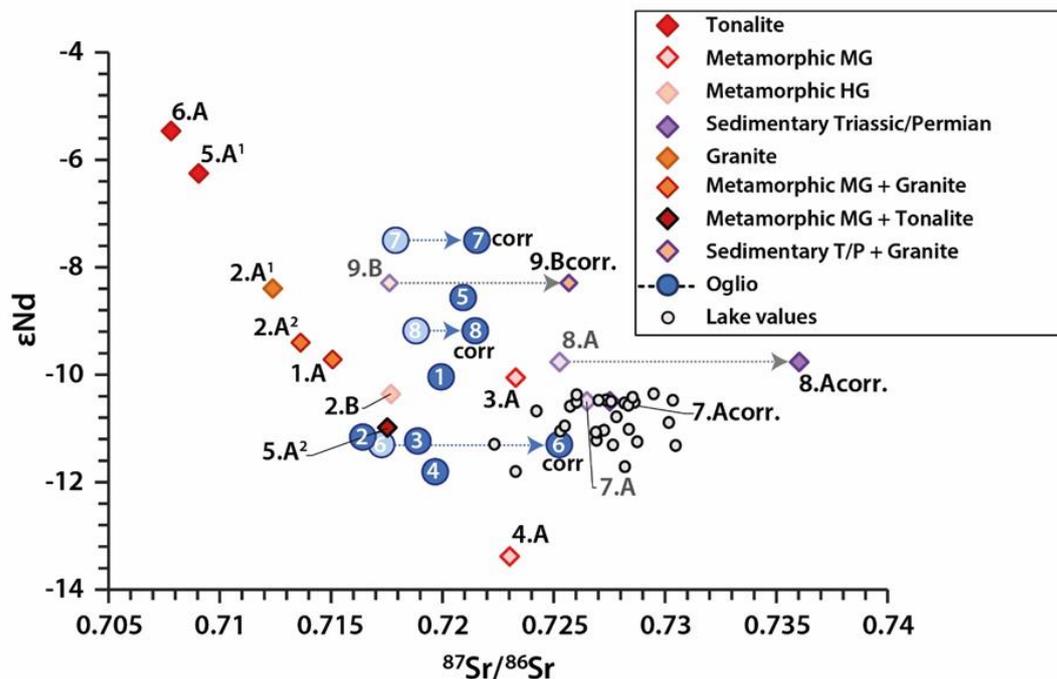


Figure 4 - Composition isotopique en Nd et Sr d'échantillons de sédiments silico clastiques du lac Iseo (petits cercles gris) et d'échantillons de sédiments fluviaux provenant des sous-bassins versants de l'Oglio en amont du lac Iseo (diamants) et de la vallée principale de l'Oglio (grands cercles bleus). Les symboles des sous-bassins versants de l'Oglio (diamants) sont colorés en fonction des types de roches dominantes sous-jacentes au bassin versant. Les échantillons de sédiments de la vallée principale de l'Oglio (cercles bleus) sont numérotés comme dans les figures 2 et 3. Les flèches en pointillés représentent la correction de la contribution des carbonates effectuée pour les échantillons de rivière provenant de sous-bassins versants reposant sur du calcaire, comme le montrent les étapes de lixiviation acide douce (Rapuc et al., 2021)

Afin de mieux comprendre cette analyse, définissons rapidement ce qu'on appelle éléments radioactifs et radiogéniques.

Les éléments radioactifs sont des éléments

qui sont instables et se désintègrent spontanément en émettant des rayonnements (particules et/ou énergie).

Ils se transforment en d'autres éléments au



cours de ce processus.

Exemples : l'uranium-238, le carbone-14, le radon-222.

Les éléments radiogéniques sont les éléments qui sont produits par la désintégration des éléments radioactifs. Ils résultent du processus de désintégration et sont souvent stables.

Exemples : le plomb-206 (issu de la désintégration de l'uranium-238), l'azote-14 (issu de la désintégration du carbone-14).

En résumé : Les éléments radioactifs se désintègrent. Les éléments radiogéniques sont les produits stables de cette désintégration.

Les rapports isotopiques de strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) dans les sédiments fluviaux varient également en fonction des types de roches dominantes dans chaque sous-bassin versant.

Les bassins septentrionaux, caractérisés par des roches calco-alkalines, montrent des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus faibles, tandis que les bassins versants méridionaux, avec des roches métamorphiques et sédimentaires, présentent des valeurs plus élevées. Cependant, aucune des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sous-bassins versants ne correspond exactement aux valeurs les plus élevées observées dans les sédiments lacustres (Fig 4).

En résumé, l'analyse des isotopes ϵNd et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sédiments fluviaux suggère une diversité géologique significative dans les sources de ces sédiments, mais ne permet pas d'expliquer complètement les caractéristiques isotopiques spécifiques observées dans les sédiments lacustres du lac Iseo.

3 Interpréter les ratios isotopiques de Sr et Nd en termes de traçage des sources de sédiments

Deux hypothèses sont avancées avant de pouvoir interpréter les données isotopiques en strontium (Sr) et néodyme (Nd) du lac Iseo et de la rivière Oglio, concernant la contribution

des différentes sources de roches aux sédiments du lac :

Toutes les principales sources de sédiments ont été échantillonnées.

Les signatures isotopiques des différentes sources de roches sont restées constantes au fil du temps.

Étant donné que la composante carbonatée des sédiments a été éliminée, les signatures isotopiques Sr-Nd des échantillons du lac peuvent être interprétées comme un mélange des sources de silicates identifiées. Pour quantifier les contributions des sources de roches au fil du temps, les "pôles" du mélange doivent être identifiés et leurs signatures doivent être déterminées. Pour cela, des échantillons de sédiments provenant de sous-bassins versants présentant une lithologie homogène ont été sélectionnés.

Sur les 8 échantillons sélectionnés, trois sources principales ont été identifiées :

Roches calco-alkalines ("A")

Roches métamorphiques ("B")

Roches sédimentaires ("C")

Les sous-bassins versants drainant principalement des roches calco-alkalines ont été regroupés en une seule source de "roches calco-alkalines". Les sous-bassins versants dominés par des roches métamorphiques ont été regroupés dans la source "métamorphique", et ceux dominés par des roches sédimentaires ont été regroupés dans la source "roches sédimentaires".

Une fois les sources identifiées, une méthode de mélange a été utilisée pour estimer les contributions relatives de chaque source aux sédiments lacustres. Les compositions isotopiques en Sr et Nd des sédiments lacustres dépendent des concentrations et des signatures isotopiques de chaque source de roches, ainsi que de la proportion de chaque source contribuant au mélange.



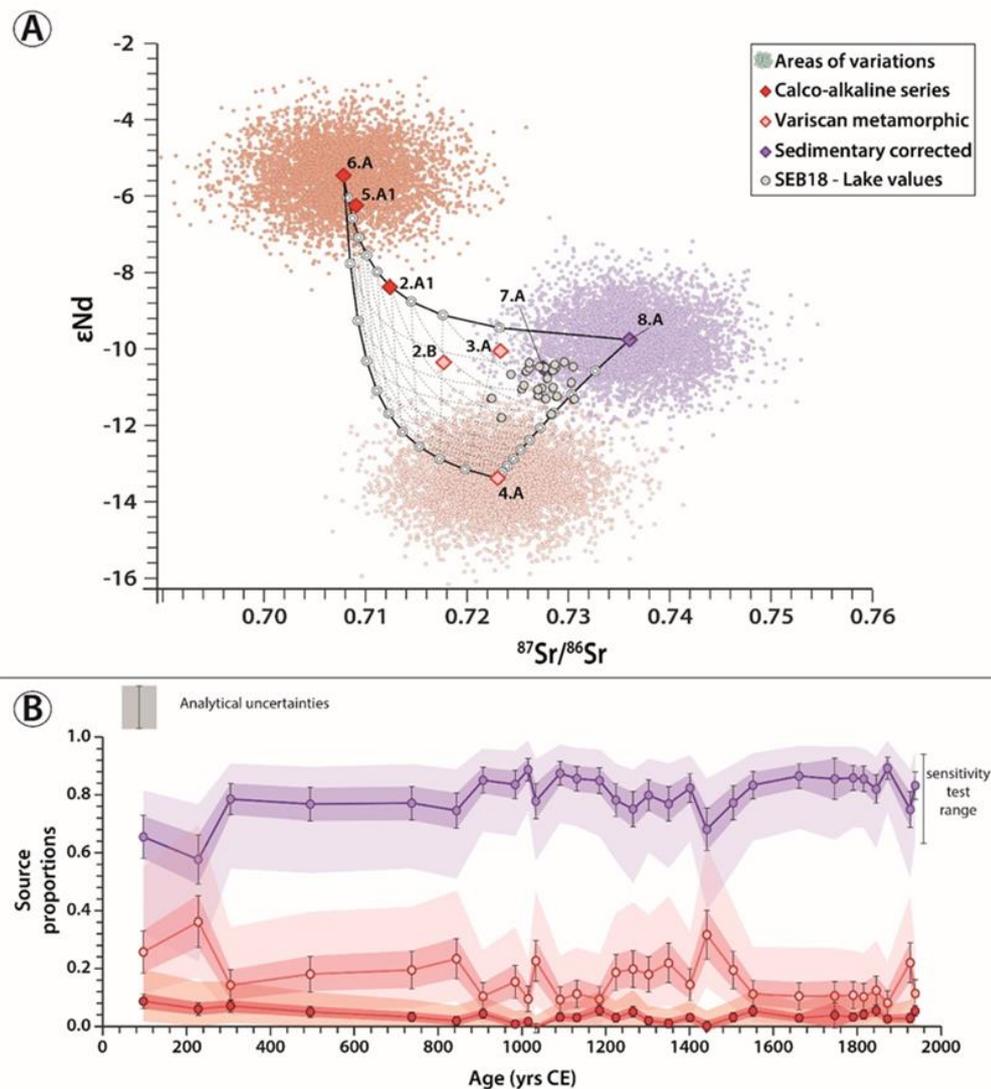


Figure 1 - Résultats du modèle de mélange. (A) Signatures isotopiques Nd-Sr des trois sources de roches identifiées, utilisées comme éléments finaux pour expliquer la composition des sédiments lacustres. Les échantillons 6.A, 8.A et 4.A sont utilisés pour contraindre la composition des éléments finaux des roches. Les sédiments lacustres sont représentés par des cercles gris à l'intérieur d'un réseau décrit par des hyperboles de mélange. Les symboles roses, rouges et violets correspondent à la composition de chaque itération de Monte Carlo utilisée pour le test de sensibilité. (B) Contributions fractionnelles de chaque source de roche aux sédiments du lac d'Iseo en fonction du temps (an CE). La propagation des incertitudes analytiques est représentée par des barres d'erreur et par des zones ombrées foncées, correspondant aux D84 et D16 de la distribution des paramètres obtenus à partir des simulations de Monte Carlo. Les zones ombrées claires représentent la propagation de l'incertitude associée à la composition des trois sources de roches, à nouveau avec les D84 et D16 de la distribution des paramètres obtenus à partir des simulations de Monte Carlo (Rapuc et al., 2021)



Les résultats montrent que la source "roches sédimentaires" est le principal contributeur aux sédiments du lac Iseo, avec une contribution moyenne d'environ 79,6 %. Les sources "roches métamorphiques" et "roches calco-alcalines" contribuent respectivement à environ 16,7 % et 3,5 % en moyenne (Fig. 5).

Des tests de sensibilité ont été réalisés pour évaluer l'impact des incertitudes sur les résultats, et ils confirment que la source "roches sédimentaires" reste le contributeur prédominant aux sédiments du lac Iseo.

En conclusion, cette approche de modélisation permet de mieux comprendre l'évolution de la contribution de chaque source de roche aux sédiments du lac Iseo au fil du temps, en tenant compte des incertitudes associées aux données isotopiques et géologiques.

4 Calcul de la charge sédimentaire :

Une fois que la proportion d'apports de chaque source de sédiments dans le lac a été calculée, on peut estimer les charges sédimentaires correspondantes pour évaluer les taux d'érosion à l'échelle du bassin versant.

Les sédiments dans les lacs comme celui d'Iseo sont composés de matériaux limoneux fluviaux et de dépôts authigènes. Peu ou pas de carbonates authigènes sont préservés dans le bassin profond du lac Iseo, ce qui en fait un bon indicateur de l'évolution de la charge sédimentaire des rivières au fil du temps et donc des taux d'érosion dans le bassin versant.

Le flux d'érosion du bassin versant au fil du temps est calculé à l'aide du calcul d'un flux silico-clastique (SCF) à partir des échantillons de sédiments lacustres. Ce flux dépend de la fraction de résidus d'ignition non carbonatés des sédiments lacustres (NCIR), du taux de sédimentation (SR) et de la densité apparente

sèche des échantillons (DBD).

La charge sédimentaire (SY) est définie comme la masse de sédiments qui quitte une limite, comme l'exutoire d'un bassin versant, sur une période donnée (Hinderer et al., 2013) et référence). Pour calculer la SY pour le bassin versant du lac Iseo, on estime la quantité totale de sédiments stockés dans le lac par unité de temps.

Ensuite, la contribution de chaque source de sédiments est prise en compte pour calculer l'évolution des charges sédimentaires spécifiques à chaque source (SL) au cours du temps. Ces valeurs sont normalisées par zone pour obtenir une valeur de charge sédimentaire normalisée par zone pour chaque source et une valeur totale pour l'ensemble du bassin versant.

Les résultats montrent que les taux d'érosion spécifiques des zones de roches sédimentaires et calco-alcalines dans le bassin versant d'Iseo ont des valeurs d'environ 100 et 10 tonnes par kilomètre carré et par an, respectivement. Ces valeurs sont cohérentes avec les estimations précédentes pour des contextes similaires et confirment les estimations des taux d'érosion au fil du temps pour le bassin versant du lac Iseo (Panagos et al., 2015).

V Discussion

Le taux d'érosion dans la région du Val Camonica, où se trouve le lac Iseo, a évolué au fil des siècles en réponse à divers facteurs climatiques et humains.

Pendant la période romaine, le taux d'érosion total était d'environ 20 tonnes par kilomètre carré et par an. Ce taux a presque doublé jusqu'à la période médiévale, atteignant entre 30 et 40 tonnes par kilomètre carré et par an. Ensuite, il a légèrement diminué jusqu'en 1661, avant de connaître une forte augmentation pendant l'ère industrielle





jusqu'à nos jours.

Sur des échelles de temps centennales à millénaires, l'érosion est principalement influencée par les changements climatiques, le couvert végétal et l'utilisation des terres, cette dernière étant associée aux activités humaines.

Pour étudier l'impact du climat et des activités humaines sur l'érosion, l'étude s'est concentrée sur les zones de basse et moyenne altitude d'une part et les zones de haute altitude d'autre part.

Ainsi, dans les zones de haute altitude, l'érosion est influencée par les avancées et les reculs des glaciers, ainsi que par les précipitations extrêmes. Les volumes des glaciers dépendent de la température estivale et des précipitations hivernales, toutes deux liées au climat méditerranéen (*e.g.*, (Fouinat et al., 2017; Glur et al., 2015; Holzhauser et al., 2005; Le Roy et al., 2015).

Le SYCalco-alcaline, qui reflète l'érosion dans ces zones, montre une corrélation avec

les fluctuations des glaciers (Fig.6). Les périodes plus froides ont tendance à augmenter l'érosion, tandis que les périodes plus chaudes ont un effet inverse.

À des altitudes plus basses, les fluctuations climatiques ne sont pas les seuls facteurs influençant l'érosion. Les activités humaines, telles que la déforestation pour l'exploitation minière et l'augmentation de la population, ont également un impact important (*e.g.*, (Bosco et al., 2008; Panagos et al., 2015).

Entre la période romaine et le Moyen Âge, l'effondrement du système de gestion forestière romain a entraîné une augmentation de l'érosion. Ainsi, on observe une augmentation du SRYoches sédimentaires. Celui-ci reflète l'érosion (Fig.6). L'hypothèse la plus probable est que celle-ci résulte de l'effet des activités humaines et de la disparition de la gestion du milieu forestier (Büntgen et al., 2011; Comiti, 2012; Joannin et al., 2014; Marziani & Citterio, 1999; Pini, 2002).



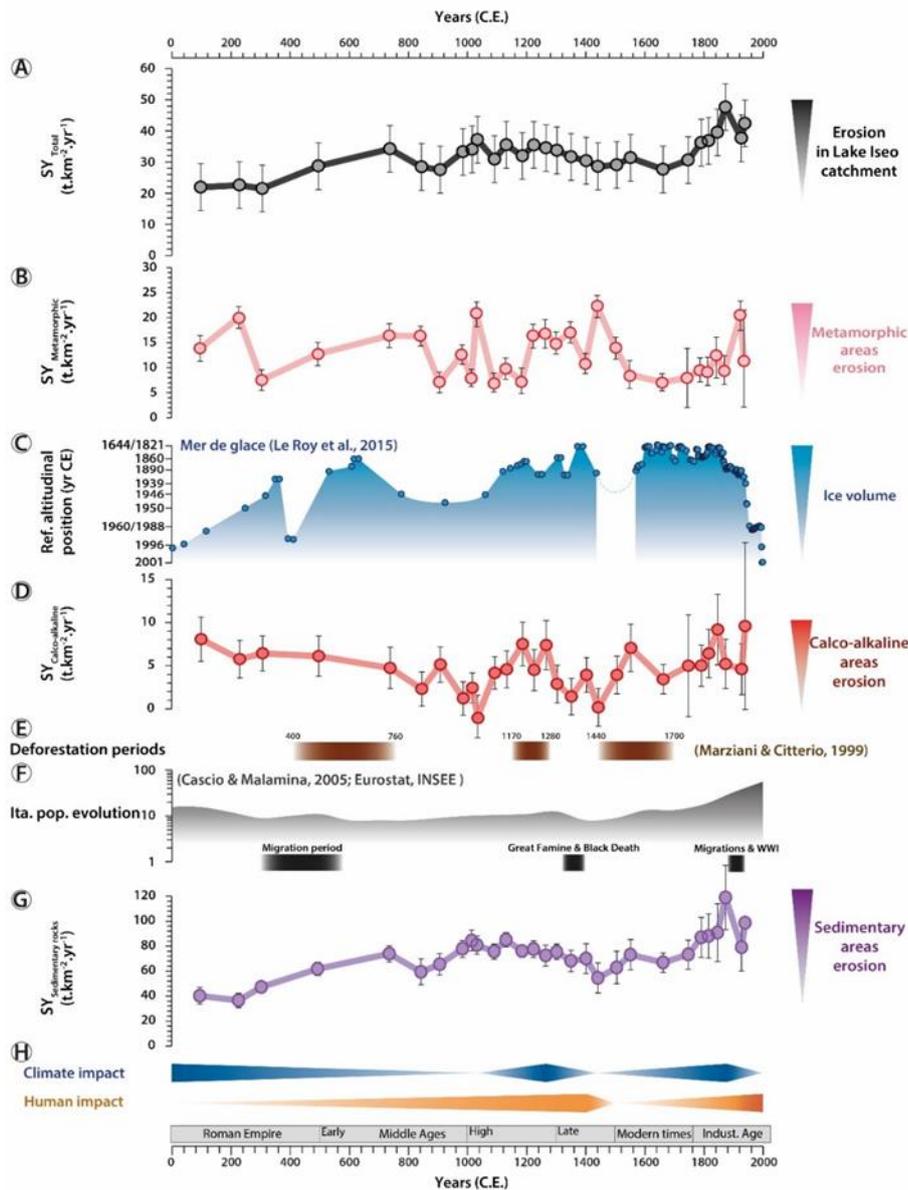


Figure 2 - Érosion dans le bassin versant du lac Iseo et évolution des facteurs de forçage au cours des 2000 dernières années. De haut en bas : (A) production totale (charge sédimentaire) de sédiments obtenue à partir de la carotte sédimentaire SEB18 (courbe noire) ; (B) production de sédiments provenant de l'érosion des zones métamorphiques dans le bassin versant du lac Iseo (courbe rose) ; (C) avancées et reculs du glacier Mer de Glace (Alpes françaises, 45° 54,9'N et 6° 56,2'E) modifiés d'après Le Roy et al. (2015 ; courbe ombrée en bleu) ; (D) la production de sédiments provenant de l'érosion des zones de roches calco-alkalines dans le bassin versant du lac Iseo (courbe rouge) ; (E) les périodes de déforestation attestées sur un site archéologique de moyenne altitude de la vallée du Val Camonica (Marziani & Citterio, 1999) ; ombres brunes) ; (F) l'évolution de la population italienne modifiée à partir de (Lo Cascio & Malanima, 2005) et de sources Eurostat et INSEE



(courbe ombrée en noir) ; les événements démographiques qui ont affecté la population italienne (ombres noires) ; (G) la production de sédiments provenant de l'érosion de la zone de "roche sédimentaire" dans le bassin versant du lac Iseo (courbe violette) ; (H) les périodes d'impact accru des activités climatiques (bleu) et humaines (orange) sur l'érosion du bassin versant du lac Iseo (Rapuc et al., 2021)

En résumé, l'érosion dans le bassin versant du lac Iseo a été influencée à la fois par le climat et par les activités humaines au fil des siècles. Les périodes de forte érosion sont souvent associées à des changements climatiques mais aussi à une intensification des activités humaines telles que la déforestation et l'exploitation minière. Comprendre ces facteurs est essentiel pour gérer efficacement les ressources naturelles et prévenir l'érosion future dans la région.

VI Conclusion

Les contributions des glaciers et des activités humaines à l'érosion ont été étudiées à partir d'une carotte de sédiments en utilisant un modèle de mélange basé sur la composition isotopique du strontium et du néodyme. La valeur absolue du signal de charge sédimentaire correspond bien aux travaux antérieurs et aux modèles d'érosion régionale, ce qui permet d'analyser ses variations par rapport aux trois principales sources.

Le signal d'érosion provenant des zones de haute altitude, qui est synchrone avec les principaux épisodes d'avancée et de recul des

glaciers européens, est interprété comme étant directement influencé par les fluctuations climatiques. En comparant les signaux d'érosion des zones de haute et de basse altitude, il a été possible de distinguer les principaux facteurs de forçage de l'érosion dans les zones de basse altitude.

Les activités humaines, telles que la déforestation, les pratiques agricoles et le pâturage, sont devenues les principaux facteurs de forçage affectant l'érosion entre la période romaine et le Moyen Âge, et de la fin du Moyen Âge à nos jours. Une multiplication par trois du taux d'érosion, passant de 36 à 118 tonnes par kilomètre carré et par an, a été observée dans les zones influencées par l'activité humaine.

Cette étude constitue la première évaluation quantitative de l'impact de l'activité humaine sur l'érosion à l'échelle d'un bassin versant dans le temps, basée sur des sédiments lacustres. Ces résultats devraient contribuer à améliorer la modélisation des impacts humains sur l'érosion de la zone critique et sur la diminution des stocks de carbone dans les sols.

Références :

Bajard, M., Poulénard, J., Sabatier, P., Bertrand, Y., Crouzet, C., Ficetola, G. F., Blanchet, C., Messenger, E., Giguet-Covex, C., & Gielly, L. (2020). Pastoralism increased vulnerability of a subalpine catchment to flood hazard through changing soil properties. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538, 109462.

Bini, A., Corbari, D., Falletti, P., Fassina, M., Perotti, C. R., & Piccin, A. (2007). Morphology and geological setting of Iseo Lake (Lombardy) through multibeam bathymetry and high-resolution seismic profiles. *Swiss Journal of Geosciences*, 100, 23-40.





Bosco, C., Rusco, E., Montanarella, L., & Oliveri, S. (2008). Soil erosion risk assessment in the alpine area according to the IPCC scenarios. *Threats to Soil Quality in Europe*, edited by: Toth, G., Montanarella, L., and Rusco, E., EUR, 23438, 47-58.

Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J. O., Herzig, F., Heussner, K.-U., & Wanner, H. (2011). 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *science*, 331(6017), 578-582.

Caro, G., Bourdon, B., Birk, J.-L., & Moorbath, S. (2006). High-precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ measurements in terrestrial rocks : Constraints on the early differentiation of the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(1), 164-191.

Collins, A., & Walling, D. (2002). Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of hydrology*, 261(1-4), 218-244.

Comiti, F. (2012). How natural are Alpine mountain rivers ? Evidence from the Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(7), 693-707.

Fouinat, L., Sabatier, P., Poulénard, J., Etienne, D., Crouzet, C., Develle, A.-L., Doyen, E., Malet, E., Reyss, J.-L., & Sagot, C. (2017). One thousand seven hundred years of interaction between glacial activity and flood frequency in proglacial Lake Muzelle (western French Alps). *Quaternary Research*, 87(3), 407-422.

Garibaldi, L., Mezzanotte, V., Brizzio, M. C., Rogora, M., & Mosello, R. (1999). The trophic evolution of Lake Iseo as related to its holomixis. *Journal of limnology*, 58(1), 10-19.

Gayer, E., Michon, L., Louvat, P., & Gaillardet, J. (2019). Storm-induced precipitation variability control of long-term erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 517, 61-70.

Glur, L., Stalder, N. F., Wirth, S. B., Gilli, A., & Anselmetti, F. S. (2015). Alpine lacustrine varved record reveals summer temperature as main control of glacier fluctuations over the past 2250 years. *The Holocene*, 25(2), 280-287.

Gosso, G., Spalla, M., Siletto, G., Berra, F., Bini, A., & F. F. (2012). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 057—Malonno. In *I.S.P.R.A.: Vol. Regione Lombardia* (p. 220).

Hajj, F., Poszwa, A., Bouchez, J., & Guérol, F. (2017). Radiogenic and “stable” strontium isotopes in provenance studies : A review and first results on archaeological wood from shipwrecks. *Journal of Archaeological Science*, 86, 24-49.

Hinderer, M., Kastowski, M., Kamelger, A., Bartolini, C., & Schlunegger, F. (2013). River loads and modern denudation of the Alps—A review. *Earth-Science Reviews*, 118, 11-44.





Holzhauser, H., Magny, M., & Zumbuühl, H. J. (2005). Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15(6), 789-801.

Joannin, S., Magny, M., Peyron, O., Vannièrè, B., & Galop, D. (2014). Climate and land-use change during the late Holocene at Lake Ledro (southern Alps, Italy). *The Holocene*, 24(5), 591-602.

Le Roy, M., Nicolussi, K., Deline, P., Astrade, L., Edouard, J.-L., Miramont, C., & Arnaud, F. (2015). Calendar-dated glacier variations in the western European Alps during the Neoglacial : The Mer de Glace record, Mont Blanc massif. *Quaternary Science Reviews*, 108, 1-22.

Lo Cascio, E., & Malanima, P. (2005). Cycles and stability. Italian population before the demographic transition (225 BC-AD 1900). *Rivista di storia economica*, 21(3), 197-232.

Marziani, G., & Citterio, S. (1999). The effects of human impact on the arboreal vegetation near ancient iron smelting sites in Val Gabbia, northern Italy. *Vegetation history and archaeobotany*, 8, 225-229.

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015). 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>

Pilotti, M., Valerio, G., & Leoni, B. (2013). Data set for hydrodynamic lake model calibration : A deep prealpine case. *Water Resources Research*, 49(10), 7159-7163.

Pini, R. (2002). A high-resolution Late-Glacial – Holocene pollen diagram from Pian di Gembro (Central Alps, Northern Italy). *Vegetation History and Archaeobotany*, 11(4), 251-262. <https://doi.org/10.1007/s003340200038>

Pini, R., Ravazzi, C., Aceti, A., Castellano, L., Perego, R., Quirino, T., & Vallè, F. (2016). Ecological changes and human interaction in valcamonica, the rock art valley, since the last deglaciation. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 29(1), Article 1.

Ramisch, F., Dittrich, M., Mattenberger, C., Wehrli, B., & Wüest, A. (1999). Calcite dissolution in two deep eutrophic lakes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19), 3349-3356. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00256-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00256-2)

Rapuc, W., Bouchez, J., Sabatier, P., Genuite, K., Poulénard, J., Gaillardet, J., & Arnaud, F. (2021). Quantitative evaluation of human and climate forcing on erosion in the alpine Critical Zone over the last 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 268, 107127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107127>

Scotti, R., Brardinoni, F., Alberti, S., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2013). A regional inventory





of rock glaciers and protalus ramparts in the central Italian Alps. *Geomorphology*, 186, 136-149.

Ont participé au travail d'écriture de cet article, en collaboration avec William Rapuc, chercheur en sédimentologie/géochimie (par ordre alphabétique) : BARRIET Cassie, BLIN Olyvier, CALVEZ Léa, CASTAY Camille, COUSSAU Lya, FILARETOS Lukas, FONTAINE BASSET Océana, FREY Lilou, HAUTIER Samuel, LANDREAU-BRETON Léo, LESUEUR Mathys, MARTELETTI Nino, MOREAU Tom, ROJO Y ARIAS Onélia, WEISSMANN-FARBOS Gaël.

Comment citer cet article : William Rapuc et la 3^{ème} C du collège Olympe de Gouges (Cadaujac, FR), *Évaluation quantitative de l'effet des activités humaines et du climat sur l'érosion de la Zone Critique alpine au cours des 2000 dernières années*, Journal DECODER, 2024-07-28

