



HAL
open science

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

Jérémy Jacob, Anaëlle Simonneau, Manon Bajard, Erwan Messenger, Yves Billaud, Claude Le Milbeau, Jérôme Poulenard, Charline Giguet-Covex, William Rapuc, Elise Doyen, et al.

► To cite this version:

Jérémy Jacob, Anaëlle Simonneau, Manon Bajard, Erwan Messenger, Yves Billaud, et al.. Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres. Elisa Nicoud; Marie Balasse; Emmanuel Desclaux; Isabelle Théry-Parisot. Biodiversités, environnements et sociétés depuis la Préhistoire : nouveaux marqueurs et approches intégrées : Actes des 41èmes Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire – Nice Côte d'Azur, Éditions APDCA, pp.123-134, 2021, 2-904110-64-X. hal-03323067

HAL Id: hal-03323067

<https://hal.science/hal-03323067>

Submitted on 20 Aug 2021

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.

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

Jérémy Jacob*, Anaëlle Simonneau**, Manon Bajard***, Erwan Messenger***, Yves Billaud****, Claude Le Milbeau**, Jérôme Poulenard***, Charline Giguet-Covex***, William Rapuc***, Elise Doyen*****, Pierre Sabatier***, David Etienne*****, Emmanuel Malet***, Bernard Fanget***, Fabien Arnaud***, Emmanuel Chapron*****, Uli von Grafenstein*, Michel Magny*****

* Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, 91198, Gif-sur-Yvette, France

** Université d'Orléans, CNRS/INSU, BRGM, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), UMR 7327, 45071 Orléans, France

*** Environnements, DYnamiques et TErritoires de la Montagne, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, Le Bourget du Lac, France.

**** Ministère de la Culture, DRASSM, Plage de l'Estaque, Marseille, France.

***** Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, France.

***** Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques, Thonon-les-Bains, France.

***** GEODE, UMR 5602 CNRS/Université de Toulouse 2, Allée A. Machado, 31058 Toulouse Cedex, France.

***** Laboratoire de Chrono-Environnement, UMR 6249 CNRS, UFR des Sciences et Techniques, 16 route de Gray, 25030 Besançon, France.

Résumé : La domestication et la diffusion des céréales furent deux étapes clé dans le développement des sociétés. Jusqu'à aujourd'hui, la diffusion du millet commun (*Panicum miliaceum*) depuis son foyer de domestication en Asie au 6^{ème} millénaire av J.C. jusqu'en Europe de l'Ouest à l'âge du Bronze a été principalement étudiée par l'analyse de graines en contexte archéologique. Une approche alternative et complémentaire consiste à tracer la présence de la miliacine, biomarqueur moléculaire du millet, dans les sédiments lacustres afin non seulement de déterminer les dates de premières cultures et consommation dans le bassin versant des lacs, mais aussi d'évaluer les phases d'emprise et de déprise au moyen des variations de concentrations de miliacine dans les sédiments. Ici, nous proposons une première synthèse régionale des dates d'apparition de la miliacine et de l'évolution de ses concentrations dans les sédiments de six lacs des Alpes italiennes et françaises (lac de Ledro et lac d'Iseo en Italie et Le Bourget, La Thuile, Paladru et Aiguebelette en France). Cette synthèse nous permet de discuter le calendrier de diffusion du millet dans les Alpes au regard des travaux en contexte archéologique, et de cerner de potentielles hétérogénéités spatiales dans la dynamique de culture de cette céréale.

Mots-clefs : millet, agriculture, diffusion, Alpes, sédiments lacustres, Age du Bronze

Summary: Domestication and diffusion of cereals lead to major transformation in ancient civilizations. For broomcorn millet (*Panicum miliaceum*), initiatives from several research groups aim at precising the timing and pathways of its diffusion from its Asian cradle during the 6th millennium BC to Western Europe during the Bronze Age, mostly from charred seeds recovered in archaeological contexts. An alternative approach consists of detecting miliacin, a molecular biomarkers that is specific to millet in lake sediments. The first occurrence of miliacin in sediments attests to the beginning of millet cultivation in the catchment and the evolution of miliacin concentration helps unraveling the dynamics of millet cultivation and consumption. Here we provide a first regional synthesis of miliacin sedimentary records from six lakes in the European Western Alps (Ledro and Iseo; Italy, Le Bourget, La Thuile, Paladru and Aiguebelette; France). This allows us (1) providing additional milestones to the journey of millet diffusion in Europe; (3) identifying potential local differences in the dynamics of millet cultivation.

Keywords: millet, agriculture, diffusion, Alps, lake sediments, bronze Age.

INTRODUCTION

La domestication des céréales et leur diffusion pendant l'Holocène est une question centrale de l'archéologie. Composant majeur de l'alimentation des sociétés humaines, elles ont accompagné leur développement et leurs transformations (ZOHARY ET HOPF 2000; JONES et al. 2011). Dans ce contexte, le millet commun (*Panicum miliaceum*) est une céréale singulière. En effet, elle ne participe pas au "Near East Package" (blé, seigle, orge) de céréales développées dans le Croissant Fertile. L'identification de la zone géographique de domestication du millet commun reste en débat, mais il est vraisemblable que cette céréale a été domestiquée en Chine au 6^{ème} millénaire BC (ZHAO 2005; CRAWFORD et al. 2006; LIU et al. 2004, 2009; BARTON et al. 2009; ZHAO, 2011). Les évidences d'une culture plus ancienne (au 10^{ème} millénaire BC) en Chine sur le site de Cishan (LU et al. 2009) ont été, depuis la publication de ces travaux, remises en cause (ZHAO 2011). Des évidences très précoces de culture du millet ont également été décrites en Europe centrale avant 5000 cal BC (LISITSINA 1984; ZOHARY ET HOPF 2000; HUNT et al. 2008). Ces découvertes suggèrent soit deux pôles indépendants de domestication du millet de part et d'autre des plaines d'Asie Centrale, soit des transferts très rapides de cette culture à travers l'Eurasie. Ces évidences les plus anciennes de millet en Europe ont été largement contredites (MOTUZAITTE-MATUCEVICIUTE et al. 2013). A l'heure actuelle, seules quelques occurrences antérieures à 2000 cal BC font encore débat, mais un consensus semble se dessiner sur une sortie du millet depuis la Chine vers l'ouest, puis une arrivée du millet aux portes de l'Europe autour de cette date (STEVENS et al. 2016; FILIPOVIC et al. 2020). JONES et al. (2011) attribuent le succès de cette céréale à son cycle de croissance court et à son adaptabilité à divers contextes environnementaux qui lui confèrent un avantage compétitif par rapport aux autres céréales. Une céréale facile à cultiver, qui donne rapidement une source d'amidon. Un autre intérêt du millet réside dans la petite taille de ses graines. D'après MARINVAL (1992), c'est ce qui explique que cette céréale est souvent retrouvée stockée avec d'autres graines de manière à réduire la porosité intragranulaire et limiter l'accès aux insectes.

La culture du millet a ensuite, entre autres, diffusé vers l'Ouest. Malgré de nombreux travaux (LISITSYNA ET PRISHCHEPENKO 1977; LISITSYNA 1984; MARINVAL 1992; ZOHARY ET HOPF 2000; HUNT et al. 2008; MOTUZAITTE-MATUCEVICIUTE et al. 2013; FILIPOVIC et al. 2020), les chemins et le calendrier de diffusion de cette céréale en Europe de l'Ouest sont encore imprécis. A l'âge du Bronze, la culture du millet est établie dans l'ensemble de l'Europe et sa consommation largement répandue puisque cette céréale constitue la base de l'alimentation, ce qui a amené MARINVAL (1995) à définir cette période comme l'âge d'Or du millet.

Jusqu'à maintenant, la dynamique de diffusion du millet à travers l'Europe a été essentiellement appuyée par la datation au radiocarbone de graines carbonisées en contexte archéologique (MARINVAL 1995; HUNT et al. 2008). Les données les plus récentes (FILIPOVIC et al. 2020) suggèrent que le millet serait arrivé dans le nord de l'Italie entre 1550 et 1450 cal BC. Les auteurs s'accordent sur des difficultés d'interprétation de certains cortèges du fait de mesures anciennes, de contextes archéologiques mal décrits ou sujets à controverses, ou de faibles cohortes de graines de millet dont l'identification est parfois discutable (HUNT et al. 2008; JACOMET 2009; MADELLA et al. 2016). Malgré les études récentes de réinterprétation (HUNT et al. 2008) et de modélisation bayésienne des âges radiocarbone mesurés sur graine de millet en contexte archéologique (FILIPOVIC et al., 2020), de nombreuses inconnues subsistent sur la dispersion de cette culture en Europe. Durant la dernière décennie, nous avons développé une approche nouvelle consistant à rechercher dans les sédiments lacustres le témoin moléculaire de la culture du millet. Il s'agit de la miliacine (éther méthylique de l'oléan-18-en-3 β -ol). Au même titre que d'autres éthers méthyliques de triterpènes pentacycliques, cette molécule est principalement synthétisée chez les Poaceae (JACOB et al. 2005). Par l'analyse de la distribution de la miliacine dans plusieurs espèces de *Panicum* et *Pennisetum*, de *Setaria italica*, et de différentes variétés de *Panicum miliaceum*, BOSSARD et al. (2013) ont démontré que ce biomarqueur est très abondant dans les graines des espèces du genre *Panicum*, et plus particulièrement *P. miliaceum*. La miliacine est aussi présente dans le genre *Pennisetum*, mais absente de plusieurs variétés de *Setaria italica*, en contradiction avec les résultats de LU et al. (2008). L'un des critères de

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

distinction du cortège moléculaire de *P. miliaceum* par rapport à celui d'autres plantes est la présence quasi exclusive de miliacine (avec des traces des éthers méthyliques de l'oléan-12- β -ol et de l'urs-12- β -ol).

Sur la base de ce critère, mais aussi de la composition isotopique en carbone ($\delta^{13}\text{C}$) de la miliacine attestant qu'elle a été synthétisée par une plante avec un métabolisme en C4 (Jacob et al., 2008b), et par confrontation avec les plantes ayant peuplé ou ayant été cultivées aux abords du lac à l'âge du Bronze (BOUBY ET BILLAUD 2001), JACOB et al. (2008a) ont proposé que la miliacine identifiée dans les sédiments du Lac du Bourget constituait un vestige de la culture du millet dans le bassin versant de ce lac. Cette hypothèse permit ensuite aux auteurs de retracer l'évolution de la culture du millet autour du lac, de déterminer la première date de culture accompagnée vraisemblablement d'une forte augmentation de l'érosion des sols (JACOB et al. 2009), puis le développement de cette culture à l'âge du Bronze. Depuis ces travaux pionniers, la résolution des mesures de concentrations en miliacine dans les sédiments du Lac du Bourget a été significativement améliorée et confortée par l'étude d'une seconde séquence sédimentaire prélevée à 4 km de la première. La qualité de ces enregistrements a permis à DUBOIS ET JACOB (2016) de proposer que les variations de concentration en miliacine dans les sédiments pouvaient refléter des changements de consommation de millet des populations peuplant le bassin versant, sans doute en lien avec des modifications démographiques. L'intérêt des enregistrements lacustres est en effet de fournir des séries temporelles continues et à haute résolution intégratives des phénomènes naturels et anthropiques qui surviennent dans le bassin versant, indépendamment de la présence de sites archéologiques, qu'ils soient absents, non-identifiés, non-fouillés ou détruits (SIMONNEAU et al. 2013a; DOYEN et al. 2015; Arnaud et al., 2016). Jusqu'à aujourd'hui, les concentrations en miliacine n'ont été déterminées que dans les séries sédimentaires de deux lacs : le Lac du Bourget (avec deux enregistrements fournissant sensiblement la même information : JACOB et al. 2008a; 2009; DUBOIS ET JACOB 2016) et le Lac de Paladru (SIMONNEAU et al. 2013a), tous deux en France.

Ici, nous étendons cette approche moléculaire à quatre nouveaux lacs des Alpes : deux en France (lac d'Aiguebelette et de La Thuile) et deux en Italie (lac de Ledro et lac d'Iseo). La confrontation des enregistrements des variations de miliacine dans ces six lacs, appuyée par la synthèse des données archéologiques associées à chacun des sites, apporte une vision régionale à la fois des premières occurrences de millet dans la région, permettant de discuter de la diffusion du millet à travers les Alpes, mais aussi de la dynamique de sa culture et de sa consommation à l'âge du Bronze et subséquemment.

MATERIELS ET METHODES

Pour ce travail nous nous appuyons sur des séries sédimentaires prélevées dans des lacs alpins ayant bénéficié de travaux préliminaires. Les descriptions des lithologies et des chronologies ont été définies antérieurement et ne seront pas présentées à nouveau ici.

SITES D'ETUDE ET SERIES SEDIMENTAIRES

Italie

Le lac de Ledro est un petit bassin (Figure 1; 3.7 km², 2.6 km de long, 1.3 km de large, 46 m de profondeur) d'origine glaciaire localisé dans le nord de l'Italie, près du lac de Garde (45°52'N/10°45'E, altitude 653 m, Figure 1). La chronologie et la lithologie de la carotte LL08-2 (46 m de profondeur, Figure 1), prélevée dans le bassin central du lac, ont été présentées par SIMONNEAU et al. (2013b) et VANNIERE et al. (2013). La miliacine a été quantifiée dans 14 échantillons prélevés hors niveaux de crues entre 3770 et 770 cal BC.

Le lac d'Iseo (181 m d'altitude) est l'un des cinq grands lacs périalpins italiens (60.9 km², 25 km de long), situé à l'aval du Val Camonica. La dépression qui accueille le lac correspond à un canyon Miocène remodelé par les avancées glaciaires Pléistocène. Le lac possède deux bassins principaux, un

profond alimenté par l'Oglio et un bassin superficiel déconnecté des apports sédimentaires du Val Camonica. La carotte SEB10 (21.4 m de long) a été prélevée en 2010 dans le lac Iseo sur le plateau de Monte Isola (45°43.312'N; 10°5.771'E), séparé du bassin profond par un escarpement de 180 m de haut. Le modèle d'âge est décrit par RAPUC et al. (2019). La carotte a été échantillonnée de manière à obtenir une résolution d'environ 100 ans sur les 6 derniers milliers d'années. Un échantillon sur deux a été analysé sauf pour deux périodes d'intérêt : l'Optimum Climatique Médiéval et la transition entre l'âge du Bronze et l'âge du Fer (autour de 800 cal BC). Cela représente au total 34 échantillons. Il n'existe que très peu de témoignages archéologiques documentant l'occupation des bords du lac (MARTINELLI et al. 2014; PINI et al. 2016).

France

Le lac du Bourget (45°45'N/5°52'E, altitude 231.5 m) est le plus grand lac naturel français (45 km², 18 km de long, 2-3 km de large, 146 m de profondeur). Le remplissage sédimentaire de ce lac a largement été étudié (ARNAUD et al. 2012 et références incluses). Les carottes étudiées ici sont la LDB01-I (N 45°44,848'; E 5°50,891', 128 m de profondeur, IGSN: EDYLDDB001), décrite dans CHAPRON et al. (2005) et ARNAUD et al. (2005), et la LDB04-I (N 45°47,140'; E 5°50,440', 107 m de profondeur, 14 m de long, IGSN: IEFRA003S) décrite par DEBRET et al. (2010), JACOB et al. (2008). Les modèles d'âges des carottes LDB01-I LDB04-I décrits par ARNAUD et al. (2005) et DEBRET et al. (2010), ont été améliorés par ARNAUD et al. (2012). 143 échantillons ont été analysés sur la carotte LDB01-I (de 2000 à 400 ans cal BC) et 219 sur la carotte LDB04-I (de 9000 ans cal BC à 1934). L'évolution des concentrations en miliacine dans la carotte LDB04-I a été présentée par JACOB et al. (2008a; 2009). L'évolution des concentrations en miliacine dans la carotte LDB01-I a été présentée par DUBOIS ET JACOB (2016). Ces deux carottes constituent les deux enregistrements de variations des concentrations en miliacine à la résolution la plus haute (entre 10 et 20 ans) pour les Alpes. Le lac du Bourget est également caractérisé par de nombreuses occupations lacustres depuis le Néolithique jusqu'au Moyen-Âge (BILLAUD 2012).

Le lac de Paladru (45°27'N/5°32'E, altitude 492 m) est un petit bassin (3.73 km², 5 km de long, 0.7 km de large, 36 m de profondeur) d'origine glaciaire. La carotte PAL09 (12 m de long) a été prélevée à 34 m de profondeur dans la partie centrale du lac (SIMONNEAU et al. 2013a). La miliacine a été analysée dans 64 échantillons de cette carotte dans l'intervalle compris entre -2360 cal BC et 205 pour obtenir une résolution moyenne d'environ 70 ans. Les évidences archéologiques sont distribuées sur les rives du lac et témoignent d'occupations depuis le Néolithique jusqu'au Moyen Âge (COLARDELLE ET VERDEL 1993; BOCQUET ET NOËL 1995; BOCQUET 2012; DOYEN et al. 2015).

Le lac d'Aiguebelette est un lac naturel d'environ 5,5 km² de superficie drainant un bassin versant de 70 km². La carotte AIG 17 III (15.5 m de long; IGSN : TOAE000000011) a été prélevée au point le plus profond du lac en 2017. Le modèle d'âge est décrit par BANJAN et al. (soumis). 28 échantillons couvrant les 5 derniers milliers d'années ont été prélevés sur cette carotte. Le lac d'Aiguebelette est entouré de sites archéologiques du Néolithique, du Bronze et du Haut Moyen Age (MARGUET 1998).

Le lac de La Thuile (45°31'50.63"N, 6°3'39.9"E, altitude 874 m) est un petit lac (0.06 km², 465 sur 156 m, 8 m de profondeur au maximum) d'origine glaciaire localisé dans le Massif des Bauges. Il draine un bassin versant de 1,6 km² culminant à 1209 m d'altitude (BAJARD et al. 2017). La carotte THU10 (18 m de long IGSN: IEFRA00BB) a été prélevée en 2010 dans la partie la plus profonde du lac (BAJARD et al. 2016). La miliacine a été quantifiée dans 30 échantillons entre 4000 BC et 2000, avec une résolution temporelle moyenne de 200 ans.

ANALYSE DE LA MILIACINE

Les sédiments séchés et broyés ont été extraits au moyen de solvants organiques sous ultrasons (voir JACOB et al. 2008a). L'extrait lipidique a ensuite été séparé en fractions neutre, acide et polaire, selon le protocole décrit dans JACOB et al. (2005). La fraction neutre est ensuite analysée par couplage entre un chromatographe en phase gazeuse et un spectromètre de masse après addition d'un standard pour quantification. L'aire de la miliacine sur le chromatogramme d'ion total est rapportée à celle du standard et ramenée à la masse de sédiment extrait pour obtenir des concentrations en ng/g de sédiment.

RESULTATS

LAC LEDRO

L'échantillon daté de 3770 cal BC dans la carotte du lac Ledro ne contient pas de miliacine détectable (Fig. 2). Les premières traces de miliacine sont trouvées dans les échantillons datés de 2750, 2700 et 2440 cal BC (8, 9 et 14 ng/g de sédiment, respectivement). Ensuite, un seul échantillon (2090 cal BC) contient la plus grande concentration en miliacine répertoriée dans des sédiments lacustres (1,5 µg/g de sédiment). Les concentrations décroissent ensuite pour atteindre un niveau aux alentours de 15-20 ng/g de sédiment entre 1600 et 1300 cal BC puis atteignent un niveau plus élevé (~100 ng/g de sédiment) entre 1200 et 800 cal BC.

LAC ISEO

Les concentrations en miliacine dans les sédiments du lac Iseo sont faibles (~10 ng/g de sédiment) entre 4100 et 1850 cal BC puis augmentent drastiquement pour atteindre 500 ng/g de sédiment en 1450 cal BC avant de chuter jusqu'à des concentrations inférieures à 100 ng/g de sédiment.

LAC DU BOURGET

Les enregistrements en miliacine dans les deux carottes du lac du Bourget sont remarquablement similaires, mais montrent tout de même quelques disparités. La miliacine n'est pas détectable dans les échantillons plus anciens que 1600 cal BC (LDB01-I) ou 1465 cal BC (LDB04-I). Les niveaux sont alors faibles (10 ng/g de sédiment), et reviennent même à 0 entre 1550 et 1530 ans cal BC (LDB01-I) et entre 1450 et 1440 ans cal BC (LDB04-I). Les concentrations en miliacine augmentent ensuite de manière irrégulière avec des périodes d'environ 100 ans caractérisées par des concentrations doubles (~150 ng/g de sédiment) comparées à un niveau de base à ~75 ng/g de sédiment, pour culminer à 250 (LDB04-I) et 380 ng/g de sédiment (LDB01-I) entre 900 et 800 cal BC. En l'espace de quelques dizaines d'années, les concentrations diminuent très fortement pour stagner aux alentours de 50 ng/g de sédiment de 800 à 550 cal BC.

LAC DE PALADRU

La miliacine est absente des sédiments plus vieux que 1350 cal BC. Ses concentrations atteignent 90 ng/g de sédiment en 1300 cal BC puis diminuent rapidement jusqu'à des niveaux inférieurs à 20 ng/g de sédiment jusqu'en 300 cal BC.

LAC D'AIGUEBELETTE

Dans les sédiments du lac d'Aiguebelette, un seul échantillon antérieur à 1500 ans cal BC présente une quantité mesurable de miliacine (3 ng/g de sédiment à 2270 cal BC). La période 1500/1100 ans cal BC est caractérisée par des concentrations inférieures à 50 ng/g de sédiment, puis une concentration nulle en 1000 cal BC. A partir de cette date, les concentrations en miliacine augmentent de manière régulière jusqu'à atteindre 320 ng/g de sédiment en 320 AD puis diminuent jusqu'à des niveaux avoisinant les 50 ng/g de sédiment.

LAC DE LA THUILE

Excepté le plus ancien échantillon (3970 cal BC), tous les sédiments du lac de La Thuile contiennent de la miliacine. De 3740 à 1700 cal BC, les concentrations en miliacine sont comprises entre 20 et 80 ng/g de sédiment. Elles augmentent ensuite pour atteindre 280 (1390 cal BC) puis 320 ng/g de

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

sédiment (1070 cal BC) avant de revenir à des niveaux compris entre 30 et 160 ng/g de sédiment puis une très forte valeur (1000 ng/g de sédiment) en 60 AD.

DISCUSSION

COMMENT LA MILIACINE PARVIENT-ELLE AU SÉDIMENT ?

La question du transfert de la miliacine depuis le lieu de culture du millet jusqu'au site de sédimentation est essentielle pour pouvoir interpréter de manière fine à la fois non seulement les premières occurrences de miliacine dans les sédiments, mais aussi la dynamique temporelle de la culture du millet. Il est bien entendu que l'enregistrement à des niveaux détectables de la miliacine dans des sédiments lacustres suppose que des quantités suffisantes de miliacine aient été produites dans le bassin versant ou que la source de miliacine a été consommée à proximité du lac. Plusieurs modes de transfert ont pu être invoqués : transport par le vent, transport par érosion des sols, ou transport direct par les populations. Nos travaux précédents ont progressivement permis de restreindre ce champ d'hypothèses sur le transfert de la miliacine. En particulier, BOSSARD et al. (2013) indiquent que la miliacine est exclusivement abondante (jusqu'à 500 µg/g) dans les graines de millet alors qu'elle n'est présente qu'en faibles concentrations dans les racines, feuilles, tiges, lemmas, paleas et glumes. Aussi, l'explication que nous avons formulée (JACOB et al. 2008) pour expliquer un transfert rapide de la miliacine du sol au sédiment par ablation et transport aériens des cires épicuticulaires des feuilles, ou par vannage n'est pas valide. Des teneurs significatives en miliacine dans les sédiments ne peuvent être expliquées que par un transport des graines qui contiennent la miliacine.

Sur la base d'études ethnographiques et d'archéologie expérimentale, POISSONNIER (1995) considère que le millet est cueilli au couteau plutôt que fauché, de manière à éviter de faire tomber les graines au sol. Cela limite le retour à la terre. Aussi, il est vraisemblable que les teneurs en miliacine des sols sont relativement faibles (confirmé par des travaux non publiés) et que le lessivage des sols n'est pas le mode principal de transfert de miliacine au sédiment. Ce mode de transfert supposerait par ailleurs des temps de latence significatifs entre le moment où le millet est produit et celui où il est archivé dans les sédiments. En effet, il faut considérer le temps que la miliacine intègre le sol, le lessivage des horizons plus ou moins profonds, le ruissellement des particules supportant la miliacine dans les cours d'eau et finalement le dépôt de ces particules au fond des lacs. Pourtant, le système de transfert de la miliacine au sédiment paraît particulièrement réactif. En effet, à la suite de l'abandon des rives du lac par la population (dernière date d'abatage en 805 BC; BILLAUD ET MARGUET 2005) les concentrations en miliacine décroissent fortement dans les sédiments du lac du Bourget en moins de 70 ans dans les deux carottes prélevées dans ce lac. Notons d'ailleurs que le pic d'abondance en miliacine est daté de 814 cal BC dans la carotte LDB01-I, donc très proche de la dernière date d'abatage, alors qu'il est daté de 841 dans la carotte LDB04-I. Cette différence n'est toutefois pas majeure, considérant les incertitudes sur les modèles d'âge. Si la date de déprise générale des bords du lac du Bourget est considérée (805 cal BC), il semble ainsi que le modèle d'âge de la carotte LDB01-I soit le plus en accord avec les datations dendrochronologiques.

Un transfert par le sol, avec stockage temporaire et cumul de miliacine produite sur plusieurs années impliquerait également le lissage/tamponnage temporel des variations d'intensité de culture ou de tonnage consommé. Ceci est à nouveau en contradiction avec l'enregistrement du lac du Bourget dans lequel des variations franches de concentrations en miliacine sont repérées, avec par exemple des doublements de la concentration en miliacine en 10 à 20 ans (Figure 2). Ces transitions abruptes dans l'évolution des concentrations en miliacine excluent des transferts verticaux de ce biomarqueur dans les sédiments, transferts qui auraient tendance à lisser le signal. Par ailleurs, la miliacine, un lipide, est hydrophobe, peu soluble dans l'eau et donc peu lessivable. Le transfert direct de la miliacine sous forme dissoute dans l'eau (depuis le lieu de production jusqu'au lieu d'archivage est donc très improbable.

Le transfert de la miliacine depuis les sols de culture jusqu'au sédiment a vraisemblablement été le résultat des activités humaines. Nous considérons en effet que l'essentiel des graines (et donc de la miliacine) a été récolté et amené aux villages palafittes au bord du lac. Les graines ont été ensuite

utilisées pour la confection de bouillies ou de pains, consommées par les habitants, puis excrétées aux abords du lac. Le millet étant également utilisé pour l'alimentation animale (TAFURI ET AL., 2009), il n'est pas exclu que le bétail ait également contribué à la miliacine sédimentaire. Au gré des courants, la miliacine (et la phase support à laquelle est associée, qu'elle soit minérale ou organique) s'est répartie de manière homogène en surface du lac avant de décanter, avec l'exception notable des fumiers s'accumulant dans les sites archéologiques qui contiennent des concentrations très élevées en miliacine, mais des volumes restreints (Jacob et al., 2011). Il s'agit du scénario le plus convaincant pour expliquer la similitude des deux enregistrements – pourtant distants de 4 km - dans le lac du Bourget (DUBOIS ET JACOB 2016). Bien que les contextes soient distincts, nous considérons que ce scénario est également valable pour les autres lacs discutés ici.

DES SIGNES PRECOSES DE LA CULTURE DU MILLET ?

Le fond géochimique sédimentaire en miliacine est assez hétérogène entre les lacs. La miliacine est absente (en deçà du seuil de détection) dans les échantillons les plus anciens des lacs d'Aiguebelette, de Ledro, du Bourget et de Paladru. A l'inverse, la miliacine est présente à de très faibles concentrations dans les échantillons les plus anciens du lac d'Iseo (de 4000 à 1600 cal BC). Elle est plus abondante (~50 ng/g) dans les niveaux anciens du lac de La Thuile, sans doute du fait de taux de sédimentation très faibles pendant cette période (BAJARD et al. 2016). Les concentrations ne montrant pas de variations marquées sur ces périodes, l'interprétation qui est faite de ce fond géochimique est que la miliacine a pu provenir d'une autre source que *P. miliaceum*. En effet, la miliacine peut être synthétisée par d'autres plantes (JACOB et al. 2005, 2008; BOSSARD et al. 2013). Toutefois, sous nos latitudes, il n'existe pas de producteurs exclusifs miliacine (au sens producteur de la miliacine comme seul éther méthylique de triterpène pentacyclique ; JACOB et al. 2005). Les faibles niveaux relevés dans les lacs d'Iseo et de La Thuile correspondraient donc à la contribution au sédiment d'une ou de plusieurs plantes productrices de miliacine mais qui soit ne représentent pas une biomasse importante dans le bassin versant (et sont donc sauvages et non cultivées), soit sont peu concentrées en miliacine. Parmi les plantes connues pour synthétiser de la miliacine (BOSSARD et al., 2013), les candidates pourraient, par exemple, appartenir au genre *Panicum* ou *Pennistum*.

Excepté ce qui est ici considéré comme le fond géochimique de miliacine non associé à la culture ou à la consommation du millet, seul le lac de Ledro se singularise de l'ensemble des autres lacs par des concentrations très élevées (jusqu'à 1500 ng/g de sédiment ; Figure 3) en miliacine antérieures à 1700 cal BC (entre 2400 et 1900 cal BC). Ce résultat est surprenant d'autant que, à la même période, les concentrations en miliacine sont très faibles dans les sédiments du lac d'Iseo, distant seulement de quelques dizaines de kilomètres. A Aiguebelette, la miliacine n'est détectée (3,5 ng/g de sédiment ; Figure 2) que dans un seul échantillon daté à 2265 cal BP. Cette date est bien plus tardive que les occupations palafittes du Néolithique sur les bords du lac enregistrées aux alentours de 2700 cal BC (MARGUET 1998). Toutefois, cette occurrence précoce de miliacine dans les sédiments du lac d'Aiguebelette est cohérente avec celles trouvées dans les sédiments du lac de Ledro. Aucun vestige archéologique ne semble accréditer la culture ou la consommation de millet sur les bords des lacs de Ledro ou d'Aiguebelette à cette période. Considérant les concentrations élevées en miliacine dans les sédiments du lac de Ledro, il semble légitime de s'interroger sur une arrivée précoce de millet, avec des tonnages significatifs de millet dans le bassin versant du lac. MOTUZAITÉ-MATUCEVICIUTE et al. (2013) rapporte que les occurrences de millet dans les sites datés du Néolithique à l'ouest du Caucase sont exclusivement constituées de quelques graines alors que les vestiges de graines de millet sont bien plus nombreux dans les sites datés du Bronze tardif. Cette idée est reprise par FILIPOVIC et al. (2020) qui indiquent que des "petits dépôts" identifiés dans les contextes archéologiques datés du Néolithique, du Chalcolithique et de l'âge du Bronze ancien ont pu être considérés comme des tests de culture de millet ou d'inclusions accidentelles parmi des céréales plus largement cultivées, la transition vers une culture intensive du millet n'étant observée, en Europe, qu'à la transition entre le Bronze Moyen et le Bronze Tardif. Les résultats apportés par FILIPOVIC et al. (2020) contredisent cette hypothèse en considérant que les "small deposits" antérieurs à 2000 BC relèvent plutôt d'un problème taphonomique que de millets effectivement cultivés précocement.

Les faibles concentrations en miliacine datés de 2265 cal BP dans les sédiments du lac d'Aiguebelette pourraient s'expliquer par ces inclusions accidentelles ou des tests de culture réalisés par les

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

populations. A l'inverse, les sédiments très riches en miliacine repérés dans le lac de Ledro entre 2400 et 1900 cal BC demeurent inexpliqués dans le contexte global de la diffusion du millet en Europe.

INITIATION DE LA CULTURE INTENSE DU MILLET A L'AGE DU BRONZE

Pour discuter de l'arrivée de la culture et de la consommation du millet dans le bassin versant d'un lac, nous considérons l'intervalle de temps entre le dernier échantillon duquel la miliacine est absente (ou à des concentrations non significativement différentes de celles du fond géochimique) et le premier échantillon contenant des concentrations significatives en miliacine. La Figure 3 résume les intervalles de première occurrence de la miliacine dans le sédiment. Hors le lac Ledro discuté plus haut, toutes les premières occurrences de miliacine sont comprises dans la période 1700-1400 cal BC.

Dans le lac d'Iseo, l'apparition de miliacine (1650-1450 cal BC; Figure 3) anticipe les dates d'occupation obtenues par dendrochronologie (MARTINELLI et al. 2014). Elle est pourtant cohérente avec les résultats de FILIPOVIC et al. (2020) qui considèrent que la culture du millet est arrivée dans la plaine du Pô vers 1570-1410 cal BC (sites de Custoza et de Lavagnone), à l'apogée de la culture Terramare (CARDARELLI, 2009). A nouveau, l'enregistrement en miliacine du lac Ledro est surprenant. La miliacine est absente ou présente à de très faibles concentrations dans les sédiments datés de cette période et n'atteint des concentrations significatives qu'entre 1300 et 1200 cal BC. Cette différence d'enregistrement dans deux lacs distincts de quelques dizaines de kilomètres reste inexpliquée.

Sur le flanc français des Alpes, les intervalles de première apparition en miliacine sont compris entre 1500 et 1350 cal BC (Aiguebelette), 1380 et 1355 cal BC (Paladru), 1710 et 1400 cal BC (La Thuile), 1600 et 1595 cal BC (LDB01-I) et 1490 et 1470 cal BC (LDB04-I; Figure 3). Aucune date de première apparition de la miliacine ne correspond à des périodes référencées d'occupations littorales (Figure 2 : MARGUET 1998; BILLAUD ET MARGUET 2005; BILLAUD 2012). En France, l'occurrence la plus ancienne de millet en contexte archéologique fut rapportée par MARINVAL (1992) à Fossé (Loir-et-Cher). Bien que l'auteur considère que les graines de ce site sont en place, il s'agirait du millet le plus ancien découvert en Europe de l'ouest, en désaccord avec les données les plus récentes (HUNT et al. 2008; FILIPOVIC et al. 2020). A La Motte-Servolex, sur les bords du Lac du Bourget, NETOLITZKY (1914) rapporte du millet daté de ~2000 cal BC. De l'avis de MARINVAL (1992), cette découverte est à prendre avec précautions car il s'agit de travaux anciens et l'identification des grains de millets n'est pas certifiée. Dans la région, une autre découverte datant du Bronze Ancien est rapportée par COQUILLAT (1955) sur le site de La Balme Gontran (Ain). Aucun enregistrement sédimentaire de la miliacine dans les lacs de la région ne permet de confirmer une utilisation antérieure à 1700 cal BC du millet (excepté le cas discuté des faibles concentrations relevées vers 2265 cal BP à Aiguebelette).

Considérant la résolution des mesures et les incertitudes sur les modèles d'âges, les intervalles de première apparition de la miliacine dans les sédiments sont remarquablement synchrones. Ceci suggère qu'il n'y a pas eu de frein majeur à ce que la culture du millet soit diffusée largement et de manière quasi-instantanée à l'échelle régionale. La cohérence des résultats sur les versants français et italien des Alpes indique par ailleurs que les Alpes n'ont pas constitué une barrière à la diffusion du millet, sans doute parce que des routes commerciales pré-existaient. Au-delà des Alpes de l'ouest, il semble que la diffusion du millet vers l'ouest de l'Europe ait été globalement très rapide. En effet, FILIPOVIC et al. (2020) remarquent qu'il n'y a quasiment pas de différences entre les dates d'apparition du millet dans les Carpates et au nord de l'Italie. Nous étendons cette observation au Alpes de l'ouest. Tout au plus, le transfert de la culture du millet depuis le bassin carpatique vers les Alpes française aurait pris quelques décennies.

Sur la base des résolutions insuffisantes d'enregistrement en miliacine (La Thuile, Aiguebelette, Iseo) et des différences de dates de premières occurrences relevées pour le lac du Bourget (1600 cal BC dans la carotte LDB01-I et 1480 cal BC dans la carotte LDB04-I), il n'est actuellement pas possible de confirmer ou d'infirmer le scénario proposé par FILIPOVIC et al. (2020) qui suggèrent que la culture du millet était restreinte au nord de la Mer Noire en 1550 cal BC et n'est arrivée dans les Alpes de l'ouest (plaine du Pô) que vers 1450 cal BC. Néanmoins, et à l'exception de Paladru, toutes les dates de première apparition de la miliacine dans les sédiments semblent antérieures à la date de 1450 cal BC retenue par FILIPOVIC et al. (2020) pour la plaine du Pô. A la lumière de nos résultats, le millet aurait pu parvenir dans la région dès 1700-1600 cal BC, ce qui demanderait à ré-évaluer les conclusions de FILIPOVIC et al. (2020).

Au-delà des dates d'apparition de la miliacine dans les sédiments, l'évolution des concentrations dans les sédiments est potentiellement porteuse d'informations cruciales sur les différences de pratiques ou les mouvements de population. Nous avons indiqué plus haut des hypothèses de travail sur la relation entre concentration en miliacine dans le sédiment et démographie (DUBOIS ET JACOB 2016). La confrontation des teneurs totales du sédiment (à l'échelle du lac) avec une estimation de la population (sur la base de la taille des occupations littorales), et en prenant en compte la concentration en miliacine dans le millet, pourrait permettre d'estimer les consommations journalières en millet par les populations (JACOB et al. 2011). Dans les lacs d'Iseo, de La Thuile, Bourget ou de Paladru, les concentrations en miliacine les plus élevées sont enregistrées pendant l'Age du Bronze et décroissent fortement à la transition Age du Bronze/Age du Fer. Ce n'est pas le cas de l'enregistrement du lac d'Aiguebelette dans lequel les plus fortes concentrations en miliacine augmentent après 800 cal BC. Les évolutions distinctes des concentrations en miliacine dans les sédiments des lacs du Bourget et d'Aiguebelette, deux lacs distants d'une dizaine de kilomètres, pourrait refléter des mouvements de population entre ces deux lacs, avec une colonisation des bords du lac d'Aiguebelette à la suite de l'abandon des rives du lac du Bourget. Cette hypothèse n'est pour le moment pas confirmée par les données archéologiques. Ces évolutions distinctes pourraient également signaler des différences très locales dans les pratiques et les habitudes de consommation.

CONCLUSION

La compilation de données anciennes et de nouvelles données sur la présence et les concentrations en miliacine dans les sédiments des lacs alpins apporte des précisions sur les modalités de diffusion de la culture de cette céréale dans à l'ouest des Alpes, sur les versants français et italien. Excepté pour le lac Ledro, les données sont très cohérentes et permettent d'imaginer l'arrivée du millet dans la région entre 1700 et 1400 cal BC. Ces résultats sont globalement en accord avec les travaux les plus récents sur la diffusion en Europe, bien qu'ils suggèrent un transfert très rapide de l'est de l'Europe vers l'ouest. Les occurrences de millet rapportées dans la littérature pour des périodes plus reculées ne sont pourtant pas entièrement disqualifiées en raison de la présence discrète de miliacine dans certains sédiments plus anciens.

Ce travail réaffirme l'intérêt des sédiments lacustres (à travers ici la miliacine) comme archives pertinentes pour identifier des activités humaines dans un bassin en absence de tout site ou vestige archéologique avéré. L'extension de notre approche à de nombreux lacs en Europe, mais aussi en Asie, devrait permettre d'obtenir une vision plus précise de la dynamique de diffusion de cette céréale, de mieux identifier les trajectoires, et de discuter des contrôles environnementaux sur le calendrier de la diffusion.

Comme le révèlent les différences d'enregistrement de la première apparition de la miliacine dans les sédiments du lac du Bourget, une attention particulière devra être apportée aux modèles d'âge des carottes sédimentaires puisque, au vu de la rapidité des transferts de millet sur de longues distances, les résolutions nécessaires sont de l'ordre de quelques décennies.

Bibliographie

- ARNAUD F., REVEL M., CHAPRON E., DESMET M. & TRIBOVILLARD N. 2005. « 7000 years of Rhône river flooding activity in Lake Le Bourget: a High-Resolution sediment record of NW Alps hydrology », *Holocene*, 15 : 420-428.
- ARNAUD F., REVILLON S., DEBRET M., REVEL M., CHAPRON E., JACOB J., GIGUET-COVEX C., POULENARD J. & MAGNY M. 2012. « Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology », *Quaternary Science Reviews*, 51 : 81-92.
- ARNAUD F., POULENARD J., GIGUET-COVEX C., WILHEM B., REVILLON S., JENNY J.P., REVEL M., ENTERS D., BAJARD M., FOUINAT L., DOYEN E., SIMONNEAU A., PIGNOL C., CHAPRON E., VANNIERE B. & SABATIER P. 2016. « Erosion under climate and human pressures: An alpine lake sediment perspective », *Quaternary Science Reviews*, 152 : 1-18.
- BAJARD M., SABATIER P., DAVID F., DEVELLE A.-L., REYSS J.-L., FANGET B., MALET E., ARNAUD D., AUGUSTIN L., CROUZET C., POULENARD J. & ARNAUD F. 2016. « Erosion record in Lake La Thuile sediments

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

- (Prealps, France): evidence of montane landscape dynamics throughout the Holocene », *The Holocene*, 26 : 350-364.
- BAJARD M., POULENARD J., SABATIER P., DEVELLE A.L., GIGUET-COVEX C., JACOB J., CROUZET C., DAVID F., PIGNOL C. & ARNAUD F. 2017. « Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene », *Catena*, 150 : 39–52.
- BANJAN M., CROUZET C., SABATIER P., JOMARD H., BAJARD M., DEMORY F., DEVELLE A.-L. JENNY J.-P., FINDLING N., ALAIN P., CLAPOT S., MESSEGER E., soumis. « The Younger Dryas-Holocene climate transition favouring large earthquakes in the Alps? » *Sedimentology*.
- BESTEL S., BAO Y.J., ZHONG H., CHEN X.C. & LIU L. 2017. « Wild plant use and multi-cropping at the early Neolithic Zhuzhai site in the middle Yellow River region, China », *The Holocene*, 28 : 195-207.
- BILLAUD Y. & MARGUET A. 2005. « Habitats lacustres du Néolithique et de l'âge du Bronze dans les lacs alpins français », in : DELLA CASA PH., TRACHSEL M. (éds), *WES'04, Wetland Economies and Societies. Proceedings of the International Conference in Zurich, 10-13 Mars 2004. Collectio Archaeologica*, 3. Chronos, Zürich, pp. 143-168.
- BILLAUD Y. 2012. « Le lac du Bourget à la fin de l'Âge du Bronze. Premiers éléments pour une reconstitution de l'occupation des zones littorales », in : HONEGGER M., MORDANT C. (éds.), *L'homme au bord de l'eau : Archéologie des zones littorales du Néolithique à la Protohistoire*. Actes du 135ème congrès CTHS "Paysages", Neuchâtel, avril 2010. *Cahiers d'Archéologie Romande*, 132 : 345-361.
- BOCQUET A. & NOËL M. 1995. « The Neolithic or Wood Age », *Endeavour New Series*, 9 : 34-41.
- BOSSARD N., JACOB J., LE MILBEAU C., SAUZE J., TERWILLIGER V., POISSONNIER B. & VERGES, E. 2013. « Distribution of miliacin (olean-18-en-3 β -ol methyl ether) in broomcorn millet (*Panicum miliaceum*), and other reputed potential sources. Consequences on the use of sedimentary miliacin as a tracer of millet », *Organic Geochemistry*, 63: 48-55.
- BOUBY L. & BILLAUD Y. 2001. Economie agraire à la fin de l'âge du Bronze sur les bords du lac du Bourget (Savoie, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, IIA, 333 : 749-756.
- CARDARELLI A. 2009. « The collapse of the Terramare culture and growth of new economic and social systems during the Late Bronze Age in Italy », *Scienze dell'Antichità. Storia archeologia antropologia*, 15 : 449-520.
- CHAPRON E., ARNAUD F., NOËL H., REVEL M., DESMET M., & PERDEREAU L. 2005. « Rhône River flood deposits in Lake Le Bourget: a proxy for Holocene environmental changes in the NW Alps, France », *Boreas*, 35: 404-415.
- COLARDELLE M. & VERDEL E. 1993. *Les habitats du lac de Paladru (Isère) dans leur environnement. La formation d'un terroir au XIe siècle. Documents d'Archéologie française*, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.
- COQUILLAT M. 1955. « Sur les grains des foyers protohistoriques de la balme-Gontran, com. de Chaley (Ain) », *Bulletin de la Société des Naturalistes d'Oyonnax*, 9 : 47-58.
- DEBRET M., CHAPRON E., DESMET M., ROLLAND-REVEL M., MAGAND O., TRENTESAUX A., BOUT-ROUMAZEILLES V., NOMADE J. & ARNAUD F. 2010. « Northwestern Alps Holocene paleohydrology recorded by flooding activity in Lake Le Bourget, France and possible relations with Mont-Blanc glaciers fluctuations », *Quaternary Science Reviews*, 29 : 2185-2200.
- DUBOIS N. ET JACOB J. 2016. « Molecular biomarkers of anthropic impacts in natural archives: A review », *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4 : 92.
- FILIPOVIĆ D., MEADOWS J., DAL CORSO M., KIRLEIS W., ALSLEBEN A., AKERET O., BITTMANN F., BOSI G., CIUTĂ B., DRESLEROVÁ D., EFFENBERGER H., GYULAI F., HEISS A.G., HELLMUND M., JAHNS S., JAKOBITSCH T., KAPCIA M., KLOOB S., KOHLER- SCHNEIDER M., KROLL H., MAKAROWICZ P., MARINOVA E., MÄRKLE T., MEDOVIĆ A., MERCURI A.M., MUELLER- BIENIEK A., NISBET R., PASHKEVICH G., PEREGO R., POKORNÝ P., POSPIESZNY Ł., PRZYBYŁA M., REED K., RENNWANZ J., STIKA H.-P., STOBBE A., TOLAR T., WASYLIKOWA K., WIETHOLD J. & ZERL T. 2020. « New AMS ¹⁴C dates track the arrival and spread of broomcorn millet cultivation and agricultural change in prehistoric Europe », *Scientific Reports*, 10 : 13698. JACOB J., DISNAR J.R., BOUSSAFIR M., SIFEDDINE A., ALBUQUERQUE A.L.S. & TURCQ B., 2005. « Pentacyclic triterpene methyl ethers in recent lacustrine sediments (Lagoa do Caçó, Brazil) », *Organic Geochemistry*, 36 : 449–461.
- JACOB J., DISNAR J.R., ARNAUD F., CHAPRON E., DEBRET M., LALLIER-VERGÈS E., DESMET M. & REVEL-ROLLAND M. 2008A. « Millet cultivation history in the French Alps as evidenced by a sedimentary molecule », *Journal of Archaeological Science*, 35 : 814-820.
- JACOB J., DISNAR J.R. & BARDOUX G. 2008b. « Carbon isotope evidence for sedimentary miliacin as a tracer of *Panicum miliaceum* (broomcorn millet) in the sediments of Lake le Bourget (French Alps) », *Organic Geochemistry*, 39 : 1077-1080.

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

- JACOB J., DISNAR J.R., ARNAUD F., GAUTHIER E., BILLAUD Y., CHAPRON E. & BARDOUX G. 2009. « Impacts of new agricultural practices on soil erosion during the Bronze Age in the French Prealps », *The Holocene*, 19 : 241-249.
- JACOB J., CHAPRON E., BILLAUD Y., LEDOUX G., LAJEUNESSE P., DISNAR J.R., ST-ONGE G., LE MILBEAU C., BOSSARD N. & ARNAUD F. 2011. « Can we estimate catchment-scale biomass production from sedimentary biomarkers? An attempt with miliacin in Late Bronze Age levels from Lake le Bourget (French Alps) », *International Meeting on Organic Geochemistry*, 18-23 septembre 2011, Interlaken, Suisse.
- JONES M., HUNT H., LIGHTFOOT E., LISTER D., LIU X. & MOTUZAITE-MATUCEVICIUTE G. 2011. « Food globalization in prehistory », *World Archaeology*, 43 : 665-675.
- LU H., ZHANG J., LIU K.B., WU N., LI Y., ZHOU K., YE M., ZHANG T., ZHANG H., YANG X., SHEN L., XU D. & LI Q. 2009. « Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago », *Proceedings of the National Academy of Science U.S.A.*, 106 : 7367-7372.
- LISITSYNA G.N. & PRISHCHEPENKO L.V. 1977. « Paleo-etnobotanicheskie nakhodki Kavkaza i Blizhnego Vostoka. (Palaeoethnobotanical finds of the Caucasus and the Near East, in Russian) », *Nauka*, Moscow.
- LISITSYNA G.N. 1984. « The Caucasus - a centre of ancient farming in Eurasia », in : VAN ZEIST W., CASPARIE, W.A (éds). *Plants and ancient man*. Balkema, Rotterdam : 285-292.
- MAGNY M., GALOP D., BELLINTANI P., DESMET M., DIDIER J., HAAS J.N., PEDROTTI A., SCANDOLARI R., STOCK A. & VANNIÈRE B. 2009. « Late-Holocene climatic variability south of the Alps as recorded by lake-level fluctuations at Lake Ledro, Trentino, Italy », *The Holocene*, 19 : 575-589.
- MARGUET A. 1998. « Bilan Scientifique des Recherches Archéologiques subaquatiques et sous-marines », Ministère de la Culture, 2003, pp. 17.
- MARINVAL P. 1992. « Archaeobotanical data on millets (*Panicum miliaceum* and *Setaria italica*) in France », *Review of Palaeobotany and Palynology*, 73 : 259-270.
- MARINVAL P. 1995. « Données carpologiques françaises sur les Millets (*Panicum miliaceum* L. et *Setaria italica* L. Beauv.) de la Protohistoire au Moyen Age », in HÖRANDNER E. (éd). *Millet. Actes du Congrès d'Aizenay (1990)*. Frankfurt, Peter Lang : 31-61.
- MILLER N.F., SPENGLER R.N. & FRACCHETTI M. 2016. « Millet cultivation across Eurasia: Origins, spread, and the influence of seasonal climate », *Holocene*, 26 : 1566-1575.
- MOTUZAITE-MATUCEVICIUTE G., JACOB J., TELIZHENKO S. & JONES M.K. 2016. « Miliacin in paleosoils from early iron age in Ukraine reveal paleofields of broomcorn millet », *Archaeological and Anthropological Sciences*, 8 : 43-50.
- MOTUZAITE-MATUCEVICIUTE G., STAFF R.A., HUNT H.V., LIU X. & JONES M.K. 2013. « The early chronology of broomcorn millet (*Panicum miliaceum*) in Europe. *Antiquity*, 87 : 1073-1085.
- NETOLITZKY F. 1914. « Die Hirse aus antiken Funden », *Sitzbuch der Keiserliche Akademie Wissenschaft der Mathematisch-Naturwissenschaft*, 123, 6 : 725-759.
- 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 Deglaciation », *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 29 : 19-24.
- POISSONNIER B. 1995. « Le premier millet en France : récolte et mouture suivant l'archéologie expérimentale », in : HÖRANDNER E. (éd). *Millet. Actes du Congrès d'Aizenay (1990)*. Frankfurt, Peter Lang : 31-61.
- VANNIÈRE B., MAGNY M., JOANNIN S., SIMONNEAU A., WIRTH S.B., HAMMAN Y., CHAPRON E., GILI A., DESMET M. & ANSELMETTI F.S. 2013. « Orbital changes, variation in solar activity and increased anthropogenic activities: controls on the Holocene flood frequency in the Lake Ledro area, Northern Italy », *Climate of the Past*, 9 : 1193-1209.
- SIMONNEAU A., DOYEN E., CHAPRON E., MILLET L., VANNIÈRE B., DI GIOVANNI C., BOSSARD N., TACHIKAWA K., BARD E., ALBERIC P., DESMET M., ROUX G., LAJEUNESSE P., BERGER J.F. & ARNAUD F. 2013. « Holocene land-use evolution and associated soil erosion in the French Prealps inferred from Lake Paladru sediments and archaeological evidences », *Journal of Archaeological Science*, 40 : 1636-1645.
- STEVENS C.J., MURPHY C., ROBERTS R., LUCAS L., SILVA F. & FULLER D.Q. 2016. « Between China and South Asia: A Middle Asian corridor of crop dispersal and agricultural innovation in the Bronze Age », *Holocene*, 26 : 1541-1555.
- TAFURI M. A., CRAIG O.E. & CANCI A. 2009. « Stable isotope evidence for the consumption of millet and other plants in Bronze Age Italy », *American Journal of Physical Anthropology*, 139 : 146-153.
- ZHAO Z. 2011. « New archaeobotanic data for the study of the origins of agriculture in China », *Current Anthropology*, 52 : 295-306.
- ZOHARY D. & HOPF M. 2000. *Domestication of plants in the Old World*. 3^{ème} édition. Oxford University Press, New York, 316 p.

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

ZOHARY D., HOPF M. & WEISS E. 2012. *Domestication of plants in the Old World: The origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin*. 4^{ème} édition. Oxford University Press, Oxford, 243 p.

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

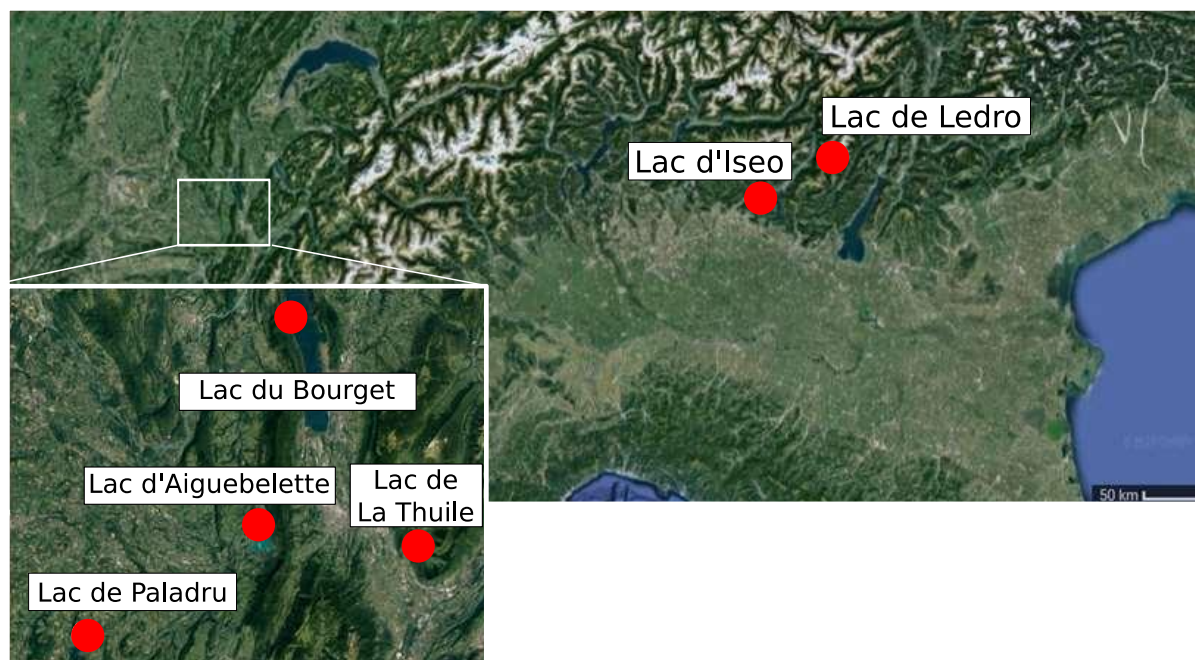


Fig. 1. Localisation des carottes sédimentaires dans lesquels les concentrations en miliacine ont été déterminées.

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

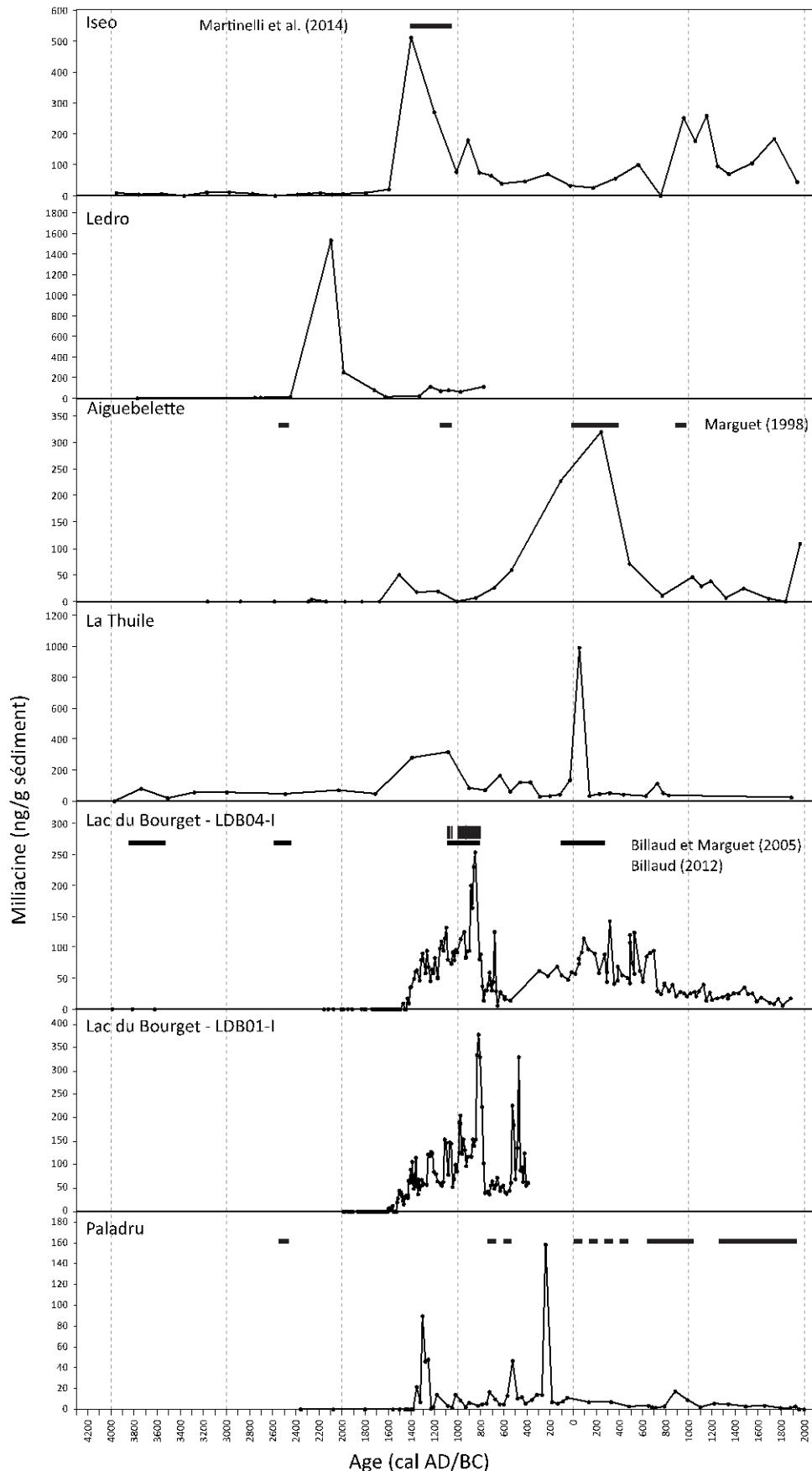


Fig. 2. Evolution des concentrations en miliacine dans les six lacs étudiés. Les périodes d'occupation littorales des lacs sont indiquées sur la base des données de la littérature par des bandes horizontales noires. Pour le Lac du Bourget : dernier cerne de croissance mesuré sur pieux (Billaud, 2012).

Diffusion et dynamique de la culture du millet dans les Alpes ouest-européennes sur la base des concentrations en miliacine dans les sédiments lacustres

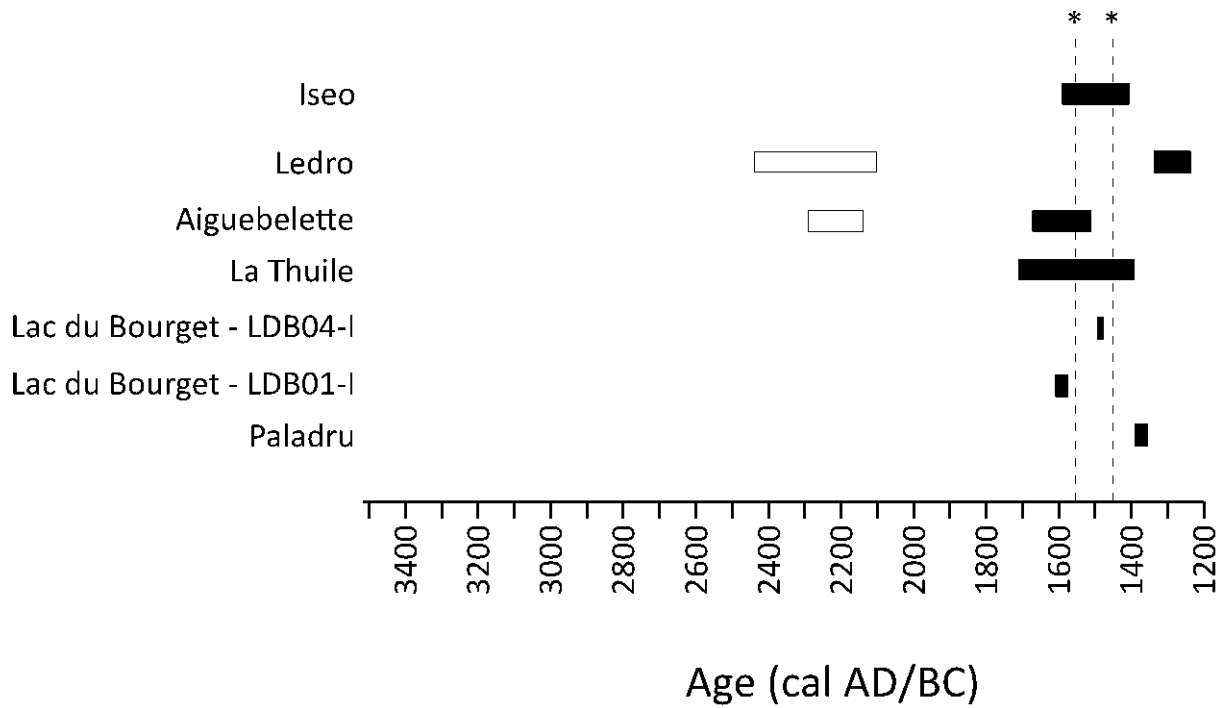


Fig. 3. Intervalles d'apparition de la miliacine dans les sédiments des lacs étudiés. Les intervalles sont définis entre le dernier sédiment ne contenant pas de miliacine, ou considéré comme participant au fond géochimique, et le premier sédiment contenant des concentrations significatives en miliacine. * : Arrivée du millet au nord de la Mer Noire (vers 1550 cal BC) et dans la Plaine du Pô vers 1450 cal BC, selon FILIPOVIC et al. (2020).