# Un nouveau traceur moléculaire pour reconstituer les activités agricoles passées dans les archives sédimentaires——A new molecular marker to reconstruct past agricultural activity from sedimentary archives

Jérémy Jacob, Jean-Robert Disnar, Fabien Arnaud

▶ **To cite this version:**

Jérémy Jacob, Jean-Robert Disnar, Fabien Arnaud. Un nouveau traceur moléculaire pour reconstituer les activités agricoles passées dans les archives sédimentaires——A new molecular marker to reconstruct past agricultural activity from sedimentary archives. La Lettre Pigb-Pmrc, 2008, 21 (avril), pp.53-57. insu-00311783

**HAL Id: insu-00311783**
**https://insu.hal.science/insu-00311783**

Submitted on 21 Aug 2008

**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.

# Un nouveau traceur moléculaire pour reconstituer les activités agricoles passées dans les archives sédimentaires

**Jérémy Jacob et Jean-Robert Disnar**
Institut des sciences de la terre (Isto)
UMR 6113 du CNRS – Université d'Orléans
1A, rue de la Férollerie - 45071 Orléans Cédex 2

**Fabien Arnaud**
EDYTEM
UMR 5204 du CNRS/Université de Savoie
Campus Savoie Technolac
F-73376, le Bourget du Lac

La théorie émise par William Ruddiman en 2003 selon laquelle la «Révolution Néolithique» serait à l'origine d'un dérèglement du climat par une émission massive de CO2 et de CH4, induite par des déforestations soutenues et la mise en place d'une riziculture intensive, a largement été critiquée puis abandonnée. Cette hypothèse s'inscrit toutefois dans le contexte d'un regain d'intérêt de la communauté scientifique pour l'étude de l'ancienneté de l'impact de l'Homme sur les milieux naturels et sur le climat.
Dans le cadre du projet Aphrodyte (Eclipse, CNRS), nous avons identifié un nouveau traceur moléculaire susceptible de fournir un éclairage original sur l'évolution des activités agricoles et sur leurs impacts sur les écosystèmes. Ce travail a été effectué dans un cadre paléoclimatique bien contraint, celui fourni par les sédiments du Lac du Bourget (Figure 1). En effet, lors des épisodes de fortes crues du Rhône, ce dernier se déverse dans le Lac du Bourget y apportant un cortège de sédiments détritiques singulièrement différents des carbonates formés sur place en période normale. Des carottes sédimentaires couvrant la majeure partie de l'Holocène ont ainsi permis de reconstituer l'évolution hydrologique de la région avec une résolution de quelques années. Par ailleurs, l'ancienneté et la persistance de l'occupation humaine dans la région sont connues dans le détail grâce à l'étude des nombreux sites archéologiques qui jalonnent les rives du lac.

## Une panoplie croissante d'outils moléculaires de diagnostic des écosystèmes actuels et passés

La géochimie organique a pour objet la caractérisation de la matière organique fossile préservée dans les sédiments, roches, et sols. Durant des années, le développement de cette discipline a accompagné l'essor de l'exploration et de l'exploitation pétrolières et en a largement bénéficié. Plus récemment, les questionnements sur l'évolution des climats et des écosystèmes passés lui ont ouvert de nouveaux champs d'investigation.
Ainsi, l'étude des époques récentes a motivé des études de calibration sur l'Actuel permettant de préciser l'origine et le devenir des biomarqueurs organiques.

**L’apport des biomarqueurs**

Dans les archives sédimentaires, les molécules organiques fossiles sont utilisées selon quatre finalités principales :

• L’identification des communautés biologiques passées lorsque la structure des molécules préservées dans le sédiment est suffisamment spécifique pour pouvoir être reliée à un taxon donné. Cette approche peut venir en complément d’études palynologiques, par exemple quand les pollens sont peu préservés (cas du Lac du Bourget) ou quand la discrimination entre les pollens de différents taxa est difficile (cas des céréales).

• Certaines molécules sont produites en proportions variables par les organismes en réponse à un stress environnemental. Ainsi, les proportions d’alcénones (cétones insaturées à longue chaîne) varient en fonction de la température du milieu de croissance des organismes qui les produisent et sont aujourd’hui couramment utilisées pour reconstituer les températures de surface de l’eau de mer. De nouveaux indices d’approximation des paramètres du climat (ou proxies), fondés sur des molécules organiques, sont actuellement en cours de développement et/ou de validation à des fins de reconstitution des paléoclimats en domaine continental.

• Selon leur stabilité, les molécules organiques subissent des modifications structurales qui témoignent des conditions physico-chimiques qui régnaient dans leur milieu d’origine, lors de leur transport puis de leur archivage dans les sédiments.

• Les signatures isotopiques des molécules organiques (en carbone, hydrogène ou oxygène) sont aussi dépendantes de paramètres affectant le milieu de production, en fonction du métabolisme des organismes producteurs. Malgré les possibilités qu’ils offrent, les biomarqueurs moléculaires restent encore peu utilisés comme outil de caractérisation des environnements et milieux, tant actuels que passés, en particulier en ce qui concerne l’impact anthropique (bien évidemment à l’exception des polluants organiques pour les périodes les plus récentes).

**La miliacine : un marqueur moléculaire du millet cultivé**

Des teneurs significatives en miliacine ont été mesurées (Figure 2) dans certains niveaux des sédiments holocènes de la carotte sédimentaire LDB04, prélevée dans le Lac du Bourget (Figure 1). Ce composé qui, selon la littérature phytochimique est essentiellement produit par des graminées, n’avait jusqu’alors été détecté qu’une fois dans des sédiments lacustres. La comparaison des données phytochimiques disponibles sur les plantes capables de synthétiser la miliacine avec les données archéobotaniques d’un site de l’Age du Bronze localisé sur les rives du lac à Grésine (Figure 1), indique que la miliacine présente dans les sédiment du Lac du Bourget a été produite par le millet commun (*P. miliaceum*) qui devait alors être cultivé aux abords du lac. Ces résultats ont été confirmés par des mesures isotopiques. En effet, la miliacine extraite des sédiments du Lac du Bourget a une signature isotopique en carbone (™13C) caractéristique de la matière organique produite par une plante avec un métabolisme dit «en C4», et donc proche du ™13C de la miliacine extraite de *P. miliaceum*, plante en C4. En revanche, *Chionochloa sp.* qui a un métabolisme dit «en C3» (comme la plupart des plantes des Alpes) produit de la miliacine isotopiquement plus légère que celle extraite des sédiments du lac du Bourget.

**Histoire de la culture du millet autour du lac du Bourget**

La première apparition de la miliacine dans l'enregistrement sédimentaire est datée d'environ 1700 av. J.-C. (Figure 2). Bien que légèrement antérieure à l'introduction supposée du millet dans la région selon les archéologues, cette date s'accorde bien avec la chronologie couramment admise de la diffusion de cette plante depuis la Chine et l'Asie Centrale vers l'Europe de l'Ouest. Les concentrations en miliacine qui augmentent ensuite jusque vers 800 av. J.-C. suggèrent une intensification de la culture du millet autour du lac. De nombreux sites de l'Age du Bronze Final ont justement été décrits sur les rives du lac, avec un maximum de dates dendrochronologiques sur pieux d'habitation autour des Xe et IXe siècle av. J.-C. Entre 800 et 400 av. J.-C., les concentrations en miliacine qui chutent brutalement témoignent d'une récession de la culture du millet. En parallèle, le flux détritique rhodanien, mesuré sur la même carotte augmente tout aussi brutalement, ce qui traduit ainsi la réponse du fleuve à un changement climatique par ailleurs connu sur l'ensemble de l'Europe du nord. Du point de vue archéologique, cette période est marquée par la fin de l'habitat périlacustre du lac du Bourget, la date d'abattage la plus récente obtenue sur pieu archéologique étant 805 av. J.-C. La culture du millet semble reprendre aux abords du lac pendant le second Age du Fer, alors que des structures périlacustres sont décrites au sud du lac vers 400 av. J.-C. sur le site de Tresserve – Le Saut de la pucelle. Ce cycle emprise / déprise agricole de la transition Bronze / Fer est bien connu des palynologues. Mais il est ici précisé chronologiquement et pour la première fois mesuré en parallèle à un marqueur climatique dans un cadre chronologique commun. La culture du millet perdure encore au cours de l'Antiquité et du Haut Moyen-Age, avant de disparaître rapidement vers 800 ap. J.-C. Cette dernière observation est en accord avec les informations historiques qui témoignent effectivement de l'abandon de cette culture entre le VIIème et le Xe siècle de notre ère.

**Voies de recherche futures**

Les résultats de ces travaux apportent ainsi une vision originale de la chronologie des impacts humains sur l'évolution des milieux. Ils soulignent également des voies de recherche futures en géochimie moléculaire. La première concerne la caractérisation des sources des biomarqueurs moléculaires. En relation avec les phytochimistes, il est essentiel de mieux caractériser les cortèges moléculaires associés à chaque plante ou algue, et, en relation avec des physiologistes, de comprendre les contrôles environnementaux sur leur production.

La seconde piste concerne la «taphonomie moléculaire». A l'instar d'autres disciplines (la palynologie en particulier), l'interprétation des «signaux moléculaires» dans les sédiments doit se fonder sur une meilleure compréhension des mécanismes de préservation et de transport des biomarqueurs moléculaires afin de préciser dans quelle mesure ils reflètent les conditions originelles du milieu. Par exemple, l'analyse du son de *P. miliaceum* révélant de fortes concentrations en miliacine (1 % du poids) nous a permis de mieux comprendre le mode de dissémination de la miliacine dans le milieu sédimentaire. Les fortes concentrations en miliacine relevées entre 1700 et 800 av. J.-C. puis entre 400 av. J.-C. et 800 ap. J.-C. résultent sans doute du transport de son de millet depuis les rives du lac lorsque les populations séparaient le grain de l'ivraie. Par

ailleurs, les plus faibles concentrations relevées entre 800 et 400 av. J.-C. puis à partir de l'an 800 ap. J.-C. pourraient illustrer le transport de miliacine vers le lac par le lessivage des sols autrefois cultivés pour le millet. Au total, ce travail permet, au sein d'une même archive sédimentaire et donc d'un même cadre temporel, de relier l'évolution du climat avec celle des activités humaines et leurs impacts conjugués sur les milieux. Il met en outre l'accent sur la nécessité de réaliser des études intégrées fédérant des spécialistes des géosciences (sédimentologie, géochimie organique et isotopique), des sciences du vivant (botanique et archéobotanique) et des sciences humaines (archéologie et histoire).

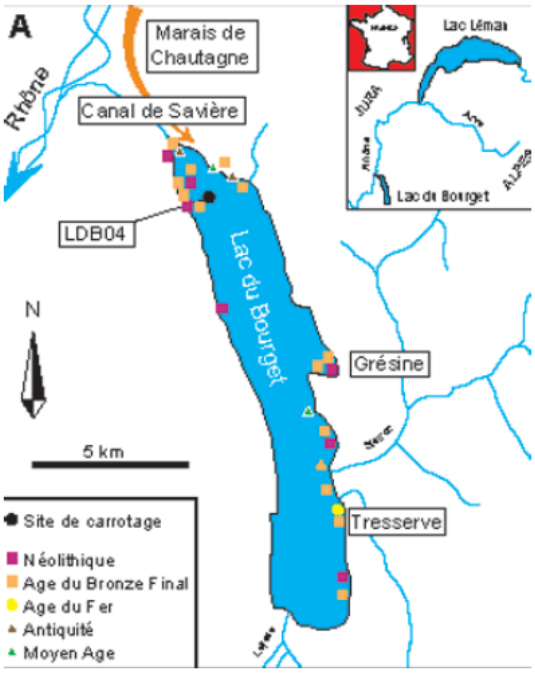


Figure 1 - A - Localisation du Lac du Bourget et site de carottage. La flèche orange indique le trajet des eaux du Rhône en période de crue, passant par le canal de Savière et le Marais de Chautagne. Les nombreux sites archéologiques reconnus sur les rives du Lac du Bourget sont également indiqués. B - Vue du Lac du Bourget depuis le sud.

*A - Location of Lake Le Bourget and coring site. The grey arrow indicates the path followed by Rhône River water during floods, across the Savière canal and the Chautagne swamp. Numerous archaeological sites identified on the lake shore are also indicated. B – A view of Lake Le Bourget.*

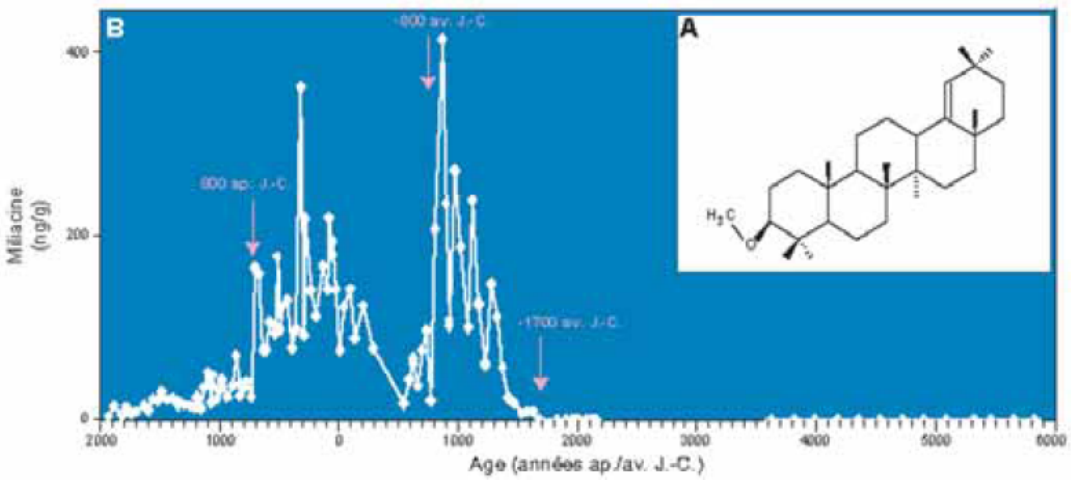


Figure 2 - A- Structure de la miliacine (éther méthylique de l'olean-18-en-3b-ol). Les molécules de ce type, caractérisées par la présence d'une fonction méthyle éther (-O-CH3) en position 3 sont essentiellement produites par des graminées. B- Evolution des concentrations en miliacine (marqueur du millet) dans les sédiments du Lac du Bourget depuis 8000 ans.

*A - Structure of miliacin (olean-18-en-3b-ol methyl ether). Molecules of this type, characterized by a methyl ether function (-O-CH3) at position 3, are synthesized essentially by Graminaceae. B- Evolution of concentrations of miliacin (tracer for broomcorn millet) in the sediments of Lake Le Bourget over the last 8000 years.*

# *A new molecular marker to reconstruct past agricultural activity from sedimentary archives*

*In 2003, William Ruddiman proposed that the Neolithic Revolution may have been responsible for an early warming event caused by massive emissions of CO2 and CH4 due to sustained deforestation and the beginning of intensive rice cultivation in Asia. Although this theory was widely criticized and later abandoned, it triggered renewed interest among the scientific community in the earliest impacts of human activities on ecosystems and climate.*
*In work conducted as part of the Aphrodyte Project (ECLIPSE, CNRS), we have identified a molecular biomarker in lacustrine sediments that provides new insights into the evolution of agricultural activities and their consequences for ecosystems. This work was carried out within the well-constrained paleoclimatic framework of the sedimentary infill of Lake Le Bourget (Figure 1). During periods of heavy rainfall over the Alps, the Rhône River floods into Lake Le Bourget and carries a detrital fraction that is significantly different from the carbonate sedimentation that normally prevails. A detailed record of hydrological variations that affected the region during the Holocene was provided by sediment cores with multiannual resolution. In addition, numerous archaeological sites described along the lake shore attest to the very early appearance and the persistence of anthropogenic pressure in the region.*

## *A growing array of molecular biomarkers for investigating past and present ecosystems*

*The aim of organic geochemistry is to characterize fossil organic matter preserved in sediments, rocks and soils. For many years this discipline developed in step with the boom in petroleum exploration and exploitation, from which it in turn gained momentum. More recently, emerging questions concerning the evolution of climate and ecosystems have opened up new fields of investigation. Studies of recent environmental changes have motivated calibration work on living material, leading to more precise understanding of the origin and decay of molecular biomarkers.*

## *Molecular biomarkers*

*Organic molecules found within sedimentary archives are interesting for four principal reasons: • They can be used to identify past biological communities when the structure of the preserved molecule is sufficiently specific to be linked to a precise taxon. This approach can complement palynological studies when, for example, pollens are not well preserved (e.g. in deep sediments in Lake Le Bourget) or when it is difficult to differentiate between pollens from different taxa (e.g. cereals).*
*• Some molecules are produced in variable proportions by their source organism in response to an environmental stress. For example, the proportions of alkenones (long chain unsaturated ketones) vary depending on the temperature of the waters in which their precursor Emiliania huxleyi grew. Their proportions in sediments are now widely used for estimating past sea surface temperatures. New palaeoclimate proxies based on organic molecules are currently under development and/or in validation phase, in order to help reconstruct paleoclimates in continental settings.*

• *Depending on their stability, molecular biomarkers may suffer structural alterations that bear witness to the physico-chemical conditions that prevailed in the ecosystem in which they were produced, or during their transportation and sedimentation.*
• *The isotopic signatures of molecular biomarkers (™13C, ™D or ™18O) are dependent on the metabolism of source organisms and on environmental parameters in the ecosystem that produced them. Despite the wide range of possibilities they afford, molecular biomarkers are still rarely used as diagnostic tools for the characterisation of past and present ecosystems; this is even more true for the study of anthropogenic impacts, with the obvious exception of organic pollutants in the very recent past.*

***Miliacin: a new molecular tracer of millet cropping***

*Significant amounts of miliacin have been measured (Figure 2) in certain levels of core LDB04 from the Holocene sedimentary infill of Lake Le Bourget (Figure 1). According to the phytochemistry literature, this compound is essentially produced by Graminaceae, and had previously been detected only once in lake sediments. The comparison of available phytochemical data on plants able to synthesise miliacin with archaeobotanical results retrieved from a Bronze Age settlement on the lake shore at Grésine (Figure 1) indicates that the miliacin found in Lake Le Bourget sediments was most probably produced by broomcorn millet (Panicum miliaceum) that was cultivated around the lake.*
*This assertion was confirmed by isotopic data. The carbon isotope composition (™13C) of miliacin extracted from the Lake Le Bourget sediments shows values typical of organic matter produced by plants with C4 metabolism, and hence close to the ™13C of miliacin extracted from P. miliaceum, a C4 plant. On the other hand, Chionochloa sp., which like most plants in the French Alps has a C3 metabolism, produces miliacin with a lighter carbon isotope composition than sedimentary miliacin.*

***History of millet cultivation around Lake Le Bourget***

*The first appearance of miliacin in the sedimentary record is dated at around 1700 BC (Figure 2). Although this date slightly precedes the known appearance of P. miliaceum in the region, it is globally in good agreement with the generally accepted chronology of the diffusion of this plant from China and Central Asia towards Western Europe. Miliacin concentrations then increase to reach a maximum before 800 BC, suggesting an intensification of millet cultivation around the lake. Numerous archaeological sites around Lake Le Bourget have been dated from the Late Bronze Age, with a peak in the number of wooden piles dated by dendrochronology between the 10th and 9th centuries BC.*
*Between 800 and 400 BC, a drastic decrease in miliacin concentrations attests to a collapse in millet cultivation. In the meantime, a sudden increase in Rhône River flooding, revealed by a higher detrital signal in the same core, indicates the river's response to a major climatic deterioration that is well documented over the whole of Northern Europe. This period is also characterised by the abandonment of lake-dwelling habitats around the lake, with the most recent wooden pile dated by dendrochronology at 805 BC.*
*Millet cultivation appears to recover during the second Iron Age, when lake-dwelling habitats are described around 400 BC at the Tresserve - Le Saut de la Pucelle archaeological site, south of the lake.*

***Directions for future research***

*These results provide original insights into the chronology of human impacts on the evolution of ecosystems. They also point to new research directions in organic geochemistry. The first direction concerns a better inventory of the source organisms of molecular biomarkers. It appears crucial to work closely with phytochemistry researchers to better identify the molecular signatures of plants and algae, and with physiologists to better understand environmental conditions controlling their production. The second direction concerns molecular taphonomy. In order to determine the degree to which sedimentary biomarkers reflect the conditions that prevailed in the original environment, the interpretation of molecular information gained from sediments must be based on a better understanding of the preservation/degradation processes that they undergo during their transportation. For example, the analysis of P. miliaceum bran reveals high concentrations of miliacin (1 % weight), which allows us to better understand how millet bran was transported from the lake shores to the sediment. The high concentrations of miliacin recorded between 1700 and 800 BC, and then between 400 BC and 800 AD, most probably result from the wind-borne transport of millet bran from the lake shores when the local population processed millet by winnowing and threshing. Lower miliacin concentrations recorded between 800 and 400 BC, and then after 800 AD, could indicate leaching of miliacin into the sediment from soils formerly cultivated for millet.*

*In conclusion, this study allows us to understand the links between climate and human activities and their combined impacts on the evolution of ecosystems, all within a single sedimentary archive and hence within a well constrained time frame. Moreover, it underlines the need for integrated studies that bring together specialists in the geosciences (sedimentology, organic and isotopic geochemistry), in the life sciences (botany and archaeobotany) and the human sciences (archaeology and history).*