



HAL
open science

La spectrométrie de masse, une technique de choix pour l'analyse moléculaire de baumes de momie

Armelle Charrié-Duhaut, Jasmine Hertzog

► To cite this version:

Armelle Charrié-Duhaut, Jasmine Hertzog. La spectrométrie de masse, une technique de choix pour l'analyse moléculaire de baumes de momie. Spectra Analyse, 2016. hal-03547855

HAL Id: hal-03547855

<https://hal.science/hal-03547855>

Submitted on 28 Jan 2022

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

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

Armelle CHARRIÉ-DUHAUT^{1*}, Jasmine HERTZOG²

**La spectrométrie de masse, une technique de choix
pour l'analyse moléculaire de baumes de momies**

¹ Laboratoire de Spectrométrie de Masse des Interactions et des Systèmes (LSMIS), UMR 7140 "Chimie de la Matière Complexe" CNRS – Université de Strasbourg, 1, rue Blaise Pascal, 67008 Strasbourg, France

² Laboratoire de Chimie et de Physique Approche Multi-échelles des Milieux Complexes, Université de Lorraine, Institut de Chimie, Physique et Matériaux (ICPM), 1 Boulevard Arago, 57078 Metz, France

* Pour correspondance : acharrie@unistra.fr

RÉSUMÉ

La caractérisation de la composition des matériaux organiques d'embaumement requiert des méthodes analytiques adaptées. En effet, ces matrices sont rendues complexes par le mélange de différentes substances naturelles. De fait, les différents procédés de fabrication, et les divers processus d'altération auxquels ils ont été soumis, nécessitent une étude basée sur l'identification structurale précise de marqueurs moléculaires par spectrométrie de masse (MS). Différentes stratégies, en particulier dans la préparation de l'échantillon avant son analyse par spectrométrie de masse, ont ainsi été développées. L'une d'elle sera illustrée par l'étude physico-chimique d'un baume provenant d'une tête de momie égyptienne.

MOTS-CLÉS

Baume - spectrométrie de masse - biomarqueur - corps gras - résine végétale - cire d'abeille

Mass spectrometry, a preferred technic for molecular analysis of mummy embalming material

SUMMARY

Compositional characterization of organic embalming material requires tailored analytical methods. Actually, these matrixes are made complex due to the combination of different natural substances. Furthermore, the different manufacture processes and the various alteration phenomenon to which these materials were submitted, need a detailed study based on the accurate structural identification of molecular markers by mass spectrometry (MS).

Different approaches have been developed, especially at the level of the sample preparation before its analysis by MS. This method is illustrated in this paper by the physicochemical study of a balm from an Egyptian mummy head.

KEYWORDS

Embalming material - mass spectrometry - biomarker - fat or oil - resin – beeswax

I – Introduction

Le terme « momie » est actuellement adopté pour désigner tout corps dont une partie ou la totalité des tissus mous (peau, muscles, cheveux) a été préservée (1). Cette préservation peut être naturelle, semi-artificielle ou artificielle grâce à des traitements *post-mortem* dans lesquels interviennent des substances qui seront appelées baumes ou matériaux d'embaumement dans cet article, quel que soit l'origine de la momie. L'objectif est toujours de conserver le corps du défunt en bloquant la dégradation des tissus notamment par les insectes ou les bactéries (biodégradation). Ce sont des conditions environnementales extrêmes qui sont à l'origine des momies naturelles : températures très basses dans les zones arctiques ou d'altitude élevée (2), extrême aridité du désert d'Atacama au Chili (3), extrême salinité pour les « Chehr Abad Salt men » (4), anoxie et acidité des tourbières pour les « bog bodies » (5).

De telles conditions étant plutôt rares, différents rites funéraires ont donc été mis en place pour préserver les corps artificiellement, comme par exemple dans le cas des momies égyptiennes, les plus connues et les plus étudiées. Les analyses physico-chimiques des matériaux d'embaumement ont révélé la présence de mélanges complexes de diverses substances naturelles utilisées pour leurs propriétés (insoluble, malléable, répulsif, produit odorant) ou pour leur symbolique. Les recettes de ces mélanges dont les écrits ne sont que très peu disponibles, semblent varier suivant les personnes pratiquant l'embaumement ou les époques, ce qui rend nécessaire leur caractérisation pour une meilleure connaissance des substances utilisées, des processus de fabrication ainsi que des rites funéraires.

D'un point de vue chimique et analytique, il s'agit de relever un réel défi. En effet, les baumes sont en général constitués d'un mélange de plusieurs substances naturelles qui, à la base, ont des compositions moléculaires complexes en termes de polarité, de volatilité et de

poids moléculaire. L'ajout d'éléments inorganiques, les modes de préparation, les éventuelles contaminations par le milieu environnant, les processus d'altération liés au vieillissement naturel, vont également conduire à des modifications des profils moléculaires augmentant ainsi le degré de complexité de l'analyse.

La stratégie mise en place ces dernières décennies consiste à rechercher des molécules diagnostiques appelées marqueurs moléculaires ou biomarqueurs, au moyen de techniques de spectrométrie de masse. La diversité de ces dernières, leur évolution en termes de sensibilité, le développement de protocoles spécifiques au contexte archéométrique afin de les rendre les moins invasifs possibles, font de la spectrométrie de masse une méthode de choix pour l'analyse moléculaire des baumes de momies. Cette approche sera détaillée dans une première partie et illustrée par l'étude d'un baume de momie égyptienne appartenant à une collection ostéologique conservée au Musée des Confluences (Lyon, France).

II – Identification de marqueurs moléculaires par spectrométrie de masse

Dans le domaine de la chimie des substances naturelles, il est maintenant clairement établi qu'un produit peut être caractérisé par un ensemble de molécules diagnostiques ou biomarqueurs, qui lui est propre et qui constitue son empreinte moléculaire. En archéométrie, les biomarqueurs ont été répartis en trois groupes : les marqueurs de l'origine biologique permettant l'identification de la substance, les marqueurs de transformations anthropogéniques informant sur les modes de préparation et les conditions d'utilisation ainsi que les marqueurs de vieillissement permettant d'estimer le degré de préservation de l'échantillon (6-9). Le squelette carboné du biomarqueur doit donc être résistant aux différentes altérations subies par le baume et être suffisamment spécifique pour être relié à

son précurseur biologique présent dans la substance naturelle (*Figure 1*). Il peut également avoir été modifié de façon représentative par des processus de dégradation anthropogénique (chauffage) ou naturel (biodégradation, oxydation abiotique ou photochimique, etc.) qui peuvent ainsi être élucidés.

Introduire Figure 1

Tout repose donc sur l'identification structurale précise de ces biomarqueurs ; la réalisation de celle-ci reposant sur des analyses par spectrométrie de masse. L'interprétation des résultats obtenus fera intervenir bien entendu les informations historiques disponibles mais également le contexte environnemental actuel de l'artéfact ainsi que l'étude comparative de substances de références contemporaines ou anciennes.

Grâce aux différentes études menées sur les baumes (e.g. 10-16), quatre groupes de substances naturelles entrant dans la composition des baumes apparaissent fréquemment : les corps gras, les résines végétales, la cire d'abeille et le bitume. Passée l'étape de détection de ces groupes, l'identification par spectrométrie de masse des biomarqueurs constituant l'empreinte moléculaire du baume permet, dans certains cas, de préciser les origines biologiques et géographiques des substances naturelles utilisées aussi bien que l'état de préservation dans lequel se trouve la momie. La figure 2 présente quelques-uns des biomarqueurs utilisés pour chaque groupe.

Introduire Figure 2

Ainsi, les corps gras sont caractérisés par une empreinte moléculaire constituée de triglycérides, d'acides gras et de stérols (dérivés du cholestérol pour les graisses animales et du sitostérol pour les huiles végétales). Les différents acides libres ou liés au glycérol dans les triglycérides forment une distribution caractéristique qui, associée le plus souvent à des

mesures du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de ces structures, permet de distinguer les huiles des graisses, ainsi que les différentes huiles végétales entre elles et les différentes graisses animales (graisses de ruminants versus graisses d'animaux monogastriques par exemple) (17). Cette mesure du rapport isotopique est réalisée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse avec mesure du rapport isotopique (18-21). Mais en contexte archéologique, il n'est pas rare que l'acide oléique $\text{C}_{18:1}$ (acide gras monoinsaturé), souvent utilisé comme diagnostique, ait disparu. Dans ce cas, c'est son produit de dégradation par auto-oxydation qui sera recherché (acide en C_9) (17).

Concernant les résines, de nombreuses familles ont été décrites. Leur distinction s'opère à partir des empreintes moléculaires principalement constituées de structures terpéniques dont le squelette est basé sur l'assemblage d'unités isopréniques en C_5 (22). Ces produits végétaux sont répartis en deux principaux groupes : les résines diterpéniques (squelettes en C_{20}) et les résines triterpéniques (squelettes en C_{30}). Les résines diterpéniques sont essentiellement produites par les gymnospermes (conifères) incluant les Pinacées, les Araucariacées, les Cupressacées, les Podocarpacees et les Taxodiacees. Les diterpènes présents sont basés sur les squelettes de l'abiétane, du pimarane ou du labdane. Les résines triterpéniques, produites par les angiospermes, proviennent des familles des Anacardiacees, des Dipterocarpacees et des Burséracées. Les triterpènes utilisés comme biomarqueurs sont basés sur les squelettes du dammarane et de l'euphane (motif tétracyclique) ainsi que du lupane, de l'oléanane et de l'ursane (squelette pentacyclique).

La cire d'abeille, quant à elle, est facilement identifiable grâce à sa distribution en structures linéaires (alcanes, alcools) et par la présence d'esters de l'acide palmitique à chaînes longues avec une forte prédominance paire (termes de C_{40} à C_{50}) appelés cérides. Profitant des

connaissances acquises en géochimie pétrolière, les bitumes sont caractérisés par leur distribution en hopanes et stéranes ; avec possibilité, alors, d'en identifier la source pétrolière au regard de différents référentiels.

III – Choix du protocole d'analyse moléculaire

L'étude chimique des baumes de momies n'en est plus à ses débuts et plusieurs méthodes d'analyse chimique ont déjà fait leur preuve. Il en est ainsi, par exemple, de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) (15, 16). Cependant, l'identification de ces mélanges complexes par cette technique globale, qui n'inclut aucune phase séparative, reste délicate. C'est la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) qui est à l'heure actuelle la plus utilisée, combinant une méthode de séparation à une méthode d'identification structurale précise. Le caractère précieux et la faible disponibilité des échantillons, de même que la complexité et le degré d'altération des mélanges ont conduit au développement de plusieurs approches d'utilisation de la GC-MS spécifiques à ce contexte archéométrique.

Parmi les différentes stratégies décrites, la préparation d'un extrait organique obtenu au moyen d'un mélange de solvants (dichlorométhane/méthanol par exemple) constitue souvent la première étape du protocole analytique (8, 9, 11, 14, 16). D'autres réaliseront une méthanolyse acide en mélangeant du chlorure d'acétyle à du méthanol (23). Cette approche est particulièrement bien adaptée pour l'analyse des polysaccharides (présents dans les gommes végétales par exemple). D'autres encore pratiqueront une saponification avec une solution hydroalcoolique d'hydroxyde de potassium (KOH) (15). Ensuite, plusieurs protocoles

analytiques sont possibles : une analyse globale, une analyse après un fractionnement fin (en général par classe de polarité) ou encore une succession des deux.

Considérons le cas d'une analyse globale de baumes. Avant d'être injecté en GC-MS sur une colonne apolaire, l'extrait de baume est le plus souvent dérivé : méthylé par du diazométhane ou silylé par du N,O-bis(triméthylsilyl)trifluoroacétamide (BSTFA). Le mélange alors obtenu est complexe. Pour y pallier, cet extrait dérivé peut subir un fractionnement succinct sur colonne de silice pour séparer les lipides analysables par GC-MS des composés très polaires ou macromoléculaires éventuellement présents. Cette analyse globale des baumes permet donc d'avoir une vision globale des constituants, sachant que les constituants majoritaires peuvent masquer la contribution minoritaire d'autres substances naturelles.

Afin d'affiner le diagnostic de composition et de degré de préservation, un protocole d'analyse plus complexe encore peut également être mis en place (9). Basé sur un fractionnement par classe de polarité des extraits organiques non dérivés, il conduit à l'analyse par GC-MS de différentes fractions correspondant aux hydrocarbures saturés, aux hydrocarbures aromatiques, esters, cétones, alcools, acides et composés polyoxygénés. La caractérisation du matériau est alors plus fine et les composés minoritaires enrichis dans certaines fractions sont alors bien identifiables.

D'autres techniques de spectrométrie de masse peuvent venir compléter de manière efficace les analyses par GC-MS. La spectrométrie de masse par désorption-ionisation laser assistée par matrice (MALDI-MS), par exemple, est une technique utilisée surtout pour les échantillons biologiques. Nous la développons cependant pour des applications en contexte archéologique en version classique et en couplage direct avec la chromatographie sur couche mince (TLC).

Introduire Figure 3

La GC-MS permet la caractérisation des lipides de bas poids moléculaires, tandis que la MALDI-MS donne accès à d'autres classes de composés susceptibles d'être présents dans les baumes : les lipides de plus haut poids moléculaires, les composés polysaccharidiques, les peptides et les protéines. Technique très sensible (limites de détection inférieures à la nanomole), la MALDI-MS nécessite une quantité très faible d'échantillon. Il suffit de déposer une goutte d'extrait organique sur la cible d'analyse. Le traitement en amont de l'analyse est donc très rapide, évitant ainsi tout risque de perte de matériel et de contamination. Ces analyses permettent ainsi de façon simple d'accéder au profil des triglycérides présents dans un échantillon et donc de caractériser chaque corps gras (*Figure 3*). L'analyse des mélanges complexes que sont les baumes peut encore se simplifier par l'introduction d'une technique séparative via le couplage TLC-MALDI-MS avec, pour résultat, la révélation des composés minoritaires.

IV – Exemple d'application

Introduire Figure 4

Deux prélèvements, de baume et de cheveux (*Figure 4*), effectués sur une tête de momie égyptienne provenant d'une collection conservée au Musée des Confluences de Lyon et « référencée T138 » au Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) ont été étudiés selon cette approche. Le premier objectif a été la datation au ^{14}C de ces échantillons. Elle fut réalisée au C2RMF. L'étude a été complétée par l'analyse du baume

« T138 B » et du résidu organique présent sur les cheveux « T138 A », afin d'en définir la composition et de mettre en évidence d'éventuelles différences.

Le baume a été traité de façon tout à fait classique en réalisant un extrait organique au moyen d'un mélange dichlorométhane/méthanol 60 :40 v/v, extrait silylé avant son injection en GC-MS. L'analyse de la substance organique enduisant les cheveux a été effectuée à partir de l'extrait obtenu lors de l'étape de nettoyage-dégraissage de l'échantillon du protocole opératoire de datation au ^{14}C (24). Cet extrait a ensuite été traité de la même façon que l'extrait organique du baume (silylation puis injection en GC-MS). Cette étape de nettoyage-dégraissage est importante. Elle permet d'ôter non seulement les particules solides dues par exemple à l'environnement, mais également les matériaux organiques déposés sur les cheveux dont la présence pourrait fausser les résultats de datation (24).

Cet extrait rendu disponible par la réalisation des datations, il paraît judicieux de l'analyser pour en connaître la composition. Cependant, il s'avère nécessaire d'estimer si sa composition est bien représentative du baume déposé sur le corps. En effet, l'obtention de cet extrait diffère quelque peu de l'extraction classique au dichlorométhane/méthanol en ce qu'elle fait intervenir successivement des lavages des cheveux à l'eau, au dichlorométhane/méthanol 50 : 50 (v/v), à l'eau, à l'acétone puis de nouveau à l'eau.

[Introduire Figure 5](#)

La figure 5 présente des chromatogrammes relativement similaires pour les deux extraits, mais assez complexes. Ils sont dominés par des acides et alcools linéaires (termes en C_{16} et C_{18} majoritaires), quantitativement plus abondants dans le baume que dans le résidu comparativement aux autres composés présents. Des diacides, en particulier l'acide azélaïque, ont été également détectés.

L'origine de ces structures linéaires reste délicate à définir à ce stade. Cela nécessiterait, par exemple, de mesurer les rapports isotopiques $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de ces structures. Elles pourraient provenir de corps gras animaux ou végétaux ajoutés aux baumes, sans oublier la contribution des lipides corporels. Ceci est d'autant plus vrai qu'à la fois des stérols végétaux (dérivés du stigmastérol) et animaux (dérivés du cholestérol) ont été détectés (*Figure 6*).

Introduire Figure 6

L'utilisation de fragmentogrammes de masse facilite l'identification des différentes structures en augmentant la sensibilité. Il s'agit d'une extraction à partir du courant ionique total d'un ion correspondant à une fragmentation caractéristique d'un composé en MS. Résultat : aucun diterpène n'a été détecté. Des structures triterpéniques telles que l' α -amyronone et la β -amyronone sont, par contre, clairement identifiables à la fois dans le baume et dans le résidu sur les cheveux (*Figure 6*). Cependant, ces triterpènes sont ubiquistes et aucun autre biomarqueur plus diagnostique d'une famille de résine triterpénique n'a pu être identifié. En revanche, des cérides, biomarqueurs de la cire d'abeille (fragment caractéristique m/z 257, *figure 6*) ont été détectés, mais uniquement dans le baume (termes en C_{40} , C_{42} , C_{44}).

Le résidu sur les cheveux a donc une composition très proche du baume qui comprend un corps gras et une résine triterpénique. Il pourrait donc être utilisé pour réaliser l'analyse des matériaux d'embaumement, ce qui limiterait le nombre de prélèvements. L'absence de cérides dans l'extrait du résidu pourrait s'expliquer par un baume légèrement différent déposé sur les cheveux. En effet, les cérides sont très stables, facilement extractibles par les solvants organiques et très peu solubles dans l'eau : s'il y en avait, il apparaît peu probable qu'ils n'aient pas été extraits selon le protocole utilisé.

V - Conclusion

Les matériaux d'embaumement se révèlent être des mélanges complexes plus ou moins dégradés nécessitant pour leur caractérisation des études moléculaires fines. Même si une grande variabilité existe dans les protocoles de préparation des extraits et de fractionnement de ces derniers, au final, c'est la spectrométrie de masse qui est utilisée pour réaliser l'identification. Elle permet de répondre à différents questionnements là où simplement des hypothèses pouvaient être faites, en s'appuyant sur des données structurales précises. De plus, cette technique toujours plus sensible permet de limiter les quantités à prélever, ce qui est un avantage certain dans l'étude des matériaux du Patrimoine.

Bibliographie

- (1) LYNNERUP N, Mummies, *Am. J. Phys. Anthropol.*, 2007, 134, 162-190.
- (2) JANKO M., STARK R.W., ZINK A., Preservation of 5300 Year old red blood cells in the Iceman, *J. R. Soc. Interface*, 2012, 1-10.
- (3) ARRIAZA B.T., Beyond death: the Chinchorro mummies of ancient Chile, *Smithsonian Institution Press*, 1995.
- (4) RAMAROLI V., HAMILTON J., DITCHFIELD P., FAZELI H., AALI A., CONINGHAM R.A.E., POLLARD A.M., The Chehr Aad "Salt men" and the isotopic ecology of humans in ancient Iran, *Am. J. Phys. Anthropol.*, 2010, 143, 343-354.
- (5) EVERSHED R.P., Chemical composition of a bog body adipocere, *Archaeometry*, 1992, 34, 253-265.

- (6) EVERSLED R.P., Organic residue analysis in archaeology: the archaeological biomarker revolution, *Archaeometry*, 2008, 50, 895-924.
- (7) COLOMBINI M.P., MODUGNO F., *Organic mass spectrometry in art and archaeology*, chap.8, John Wiley & Sons, 2009.
- (8) CHARRIE-DUHAUT A., BURGER P., MAURER J., Molecular and isotopic archaeology : Top grade tools to investigate organic materials, *Comptes Rendus Chimie*, 2009, 12, 1140-1153.
- (9) CHARRIE A., LEPROVOST C., Biomarqueurs et GC/MS: des principes clés pour la caractérisation, la conservation et la restauration des objets du patrimoine. Application à un adhésif végétal néolithique, *Spectra Analyse*, 825, 32-39.
- (10) BUCKLEY S.A., EVERSLED R.P., Organic chemistry of embalming agents in Pharaonic and Graeco-Roman mummies, *Nature*, 2001, 413, 837-841.
- (11) MAURER J., MÖHRING T., RULLKÖTTER J., Plant lipids and fossil hydrocarbons in embalming material of Roman Period mummies from the Dakhleh Oasis, Western Desert, Egypt, *J. Archaeological Science*, 2002, 29, 751-762.
- (12) KOLLER J., BAUMER U., KAUP Y., SCHMID M., WESER U., Analysis of a pharaonic embalming tar, *Nature*, 2003, 425, 784.
- (13) BUCKLEY S.A., CLARK K.A., EVERSLED R.P., Complex organic chemical balms of Pharaonic animal mummies, *Nature*, 2004, 431, 294-299.
- (14) CHARRIE-DUHAUT A., CONNAN J., ROUQUETTE N., ADAM P., BARBOTIN C., DE ROZIERES M.-F., TCHAPLA A., ALBRECHT P., The canopic jars of Rameses II : real use revealed by molecular study of organic residues, *J. Archaeological Science*, 2007, 34, 957-967.

Code de champ modifié

- (15) LUCEJKO J.J., LLUVERAS-TENORIO A., MODUGNO F., An analytical approach based on X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy and gas chromatography/mass spectrometry to characterize Egyptian embalming materials, *Microchemical Journal*, 2012, 103, 110-118.
- (16) MENAGER M., AZEMARD C., VIEILLESZAZES C., Study of Egyptian mummification balms by FT-IR spectroscopy and GC-MS, *Microchemical Journal*, 2014, 114, 32-41.
- (17) BASTIEN C., Étude chimique des substances contenues dans une collection exceptionnelle de poteries provenant de Deir el-Médineh (Egypte) : une population et ses produits, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2011.
- (18) EVERSLED R.P., DUDD S.N., CHARTERS S., MOTTRAM H., STOTT A.W., RAVEN A., VAN BERGEN P.F. AND BLAND H.A., Lipids as carriers of anthropogenic signals from prehistory, *The Royal Society*, 1999, 354, 19-31.
- (19) GREGG M.W., SLATER G.F., A new method for extraction, isolation and transesterification of free fatty acids from archaeological pottery, *Archaeometry*, 2010, 52, 833-854.
- (20) STEELE V.J., STERN B. AND STOTT A.W., Olive oil or lard?: Distinguishing plant oils from animal fats in the archeological record of the eastern Mediterranean using gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2010, 24, 3478-3484.
- (21) ROMANUS K., VAN NEER W., MARINOVA E., VERBEKE K., A. L., ACCARDO S., HERMANS I., JACOBS P., DE VOS D. AND WAELEKENS M., Brassicaceae seed oil identified as illuminant in Nilotic shells from a first millenium AD Coptic church in Bawit, Egypt, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, 390, 783-793.

- (22) LANGENHEIM J.H., *Plant Resins: Chemistry, Evolution, Ecology, and Ethnobotany*, Timber Press, Portland, Oregon & Cambridge, 622 p., 2003.
- (23) TCHAPLA A., MEJANELLE P., BLETON J., GOURSAUD S., Characterization of embalming materials of a mummy of the Ptolemaic era. Comparison with balms from mummies of different eras, *Journal of Separation Science*, 2004, 27, 217-234.
- (24) RICHARDIN P., GANDOLFO., CARMINATI P., WALTER P., A new protocol for radiocarbon dating of hair and keratin type samples—application to an Andean mummy from the National Museum of Natural History in Paris, *Archaeological Anthropological Science*, 2011. 3(4): p. 379-384.

Remerciements

Les auteures tiennent à remercier Madame Karine Madrigal du Musée des Confluences de Lyon pour la sélection des échantillons et son assistance lors des prélèvements, le Dr. Pascale Richardin du C2RMF pour sa collaboration ainsi que Madame Laura Bom de l'Université de Strasbourg pour le prêt d'appareillage.

Légendes des figures

Figure 1 Stratégie d'études des baumes par identification de marqueurs moléculaires.

Figure 2 Exemples de biomarqueurs.

Figure 3 Spectres de masse MALDI-MS de corps gras actuels (huile d'olive et graisse de porc) indiquant la distribution des triglycérides. Extraction par un mélange dichlorométhane/méthanol/eau 1-1-0.5 (v/v). Appareil Autoflex II (Bruker Daltonics, Brême, Allemagne) équipé d'un laser à azote ($\lambda = 337$ nm) utilisé en mode réflectron positif. Matrice : acide 2.5-dihydroxybenzoïque dans un mélange eau/acétonitrile 1-1 (v/v) + 0.1% TFA.

Figure 4 Photographie des cheveux prélevés sur la tête de momie « T138 » du Musée des Confluences de Lyon (France).

Figure 5 Chromatogrammes en phase gazeuse des extraits de baume « T138B » et de résidu sur cheveu « T138A » obtenus en GC-MS. Courant ionique total (TIC) : EI 70eV ; appareil Focus GC/ISQ ThermoScientific ; colonne HP-5MS 30m x 0.25mm x 0.25 μ m ; programmation : 40°C (2min), 40-100°C (10°C/min), 100-320°C (4°C/min), 320°C (30min).

Figure 6 Fragmentogrammes de masse m/z 174+218 montrant la distribution des stérols et des triterpènes, et m/z 257 montrant la distribution des cérides dans les extraits « T138 B » (baume) et « T138 A » (résidu sur cheveu) obtenus en GC-MS selon les conditions mentionnées en légende de la figure 5.