

# Un champ de fouille dans un laboratoire...

## Initiation à la chimie du patrimoine

Xavier Bataille, Caroline Bazot, Robert Galera et Martine Regert

### Résumé

Pendant deux journées de décembre 2008, le 12<sup>e</sup> étage de l'ENCPB (École Nationale de Chimie, Physique et Biologie, Paris 13<sup>e</sup>) s'est transformé pour partie en champ de fouille du Néolithique, pour une autre en laboratoire de recherche en chimie du patrimoine et pour une troisième en salle de conférence. Cet article décrit une série d'activités expérimentales au cours desquelles des étudiants de deuxième année de BTS chimistes<sup>(1)</sup> ont mobilisé leurs connaissances en chimie analytique pour l'étude d'artefacts archéologiques. Le thème de ce projet, l'analyse de cires d'abeilles et de brais de bouleaux, est basé sur les recherches de matériaux organiques amorphes issus de substances naturelles menées par Martine Regert, directrice de recherche au CNRS. Ce projet a permis d'aborder plusieurs aspects de la chimie du patrimoine tels que la préparation des échantillons, la mise au point de protocoles, l'analyse par des techniques spectroscopiques (IRTF, spectrométrie de masse) et chromatographiques (CCM, CPG), ainsi que la validation analytique. Des mini-conférences ont contextualisé les activités de laboratoire.

### Mots-clés

**Archéologie, chimie analytique, chimie du patrimoine, projet pédagogique.**



L'archéologie est une discipline qui étudie les vestiges abandonnés par les populations du passé afin de reconstituer leurs modes de vie (artisanats, techniques de production et de diffusion, habitudes alimentaires, vestimentaires, culturelles, culturelles), leur environnement (faune, flore, climat) et les relations Homme-milieu.

L'archéologie pratiquée au XXI<sup>e</sup> siècle s'appuie en partie sur des techniques développées par la chimie

analytique afin d'aller rechercher des informations de nature élémentaire, isotopique, moléculaire et structurale non perceptible par l'œil riches d'enseignement sur les sociétés du passé. L'« archéochimie » demande donc de multiples compétences incluant l'histoire, la géologie, la physique ou la chimie [1].

Les matériaux organiques découverts en contexte archéologique ne sont bien souvent accessibles à l'analyse qu'en très faibles quantités. Les protocoles doivent donc être optimisés de façon à minimiser le nombre d'opérations et d'analyses afin d'obtenir le maximum de renseignements. Cette contrainte impose d'apprendre à « défricher » dans une multitude d'informations celles qui seront pertinentes pour répondre aux questions posées.

Les recherches d'un des auteurs, Martine Regert [2], ont servi de support pour réaliser les expériences présentées dans cet article. Ces travaux portent sur la caractérisation d'une vaste gamme de substances naturelles, qu'il s'agisse de produits culinaires (produits laitiers, huiles végétales, boissons fermentées, etc.), de matériaux adhésifs (résines

végétales, bitume, cire d'abeille), d'onguents et parfums ou encore de matières colorantes [3].

En contexte archéologique, ces biomatériaux, bien que particulièrement sensibles aux processus de dégradation en raison de leur nature organique, peuvent se conserver sous forme de résidus adhérent à des outils lithiques ou osseux, d'encroûtements carbonisés dans des céramiques, ou encore de fragments identifiables dans la matrice sédimentaire. Du fait de leur caractère amorphe, seule une approche chimique permet de déterminer leur nature, d'appréhender leur degré de transformation par l'Homme et d'étudier les processus naturels de dégradation qu'ils ont subis au cours du temps. C'est grâce à la mise au point de méthodologies analytiques adaptées à la spécificité de ces vestiges (faible quantité conservée, matériaux composites, dégradés, hétérogènes et en partie polymérisés), qu'il est possible d'avoir des informations sur les comportements techniques et alimentaires des populations du passé en relation avec l'exploitation des substances naturelles organiques.



Figure 1 - Le chantier expérimental de fouille.



Figure 2 - Salle de conférence. Dans une vitrine des objets archéologiques étaient exposés. En bas, une des conférences organisées par Martine Regert.

## Organisation des deux séances

Nous avons choisi de reproduire, dans les locaux de l'ENCPB, ce que peut être le travail de recherche en archéochimie en organisant deux séances de 8 h. Pour cela, nous avons reproduit un chantier de fouille<sup>(2)</sup> (figure 1), installé une bibliothèque de recherche, une salle de conférence (figure 2) et deux salles de TP.



Figure 3 - Imprégnation des poteries de cire et de brai de bouleau, à chaud.

Pour simuler l'équivalent d'une fouille archéologique, des fragments de poteries achetées dans le commerce ont été enduits de produits contemporains vieilliss artificiellement, selon des techniques cherchant à reproduire les modifications et altérations induites par les traitements d'origine anthropique humaine et par le contexte d'enfouissement (figure 3).

Par journée, six groupes d'étudiants ont été constitués et répartis autour de trois thèmes principaux : participation aux opérations de fouille, étude de la cire d'abeille et du brai de bouleau. Pour ce dernier, un objectif particulier avait été fixé : l'isolement des biomarqueurs de l'écorce (bétuline et lupéol notamment).

Le travail proposé aux étudiants a été conçu en trois étapes :

- *Première étape.* Une semaine avant la séance de TP, les

étudiants devaient sélectionner des méthodes d'analyse de la cire d'abeille et du brai de bouleau en contexte archéologique en utilisant les différents articles et ouvrages mis à leur disposition tel que *Analytical Chemistry in Archeology*, *Journal of Chromatography*, *Archaeometry*, *Identification spectrométrique de composés organiques*...

- *Seconde étape.* Lors des séances de TP, les étudiants allaient mettre en œuvre point par point les différentes méthodes analytiques référencées dans les articles sélectionnés en consignait et validant l'ensemble des opérations effectuées : manipulation de petites quantités sans pollution de l'échantillon, traitements chimiques, extractions quantitatives, analyses préalables de standards (références), comparaison avec des témoins, analyses d'échantillons, validation des analyses et interprétation. Comme nous l'avons déjà décrit dans cette revue [4], il n'était plus question de suivre des protocoles détaillés qui fonctionnent – souvent – à coup sûr, mais de s'inspirer de protocoles extraits d'articles et de les adapter aux échantillons fournis, voire de les mettre au point.

- *Troisième et dernière étape.* En fin de séance, les étudiants allaient confronter leurs résultats aux publications et, après en avoir fait la synthèse, établir un protocole adapté aux différentes analyses à effectuer.

Un exemple de l'énoncé distribué aux étudiants est disponible en contactant les auteurs<sup>(3)</sup>.

Concernant l'organisation même de chaque séance, nous avons réparti les quinze étudiants sur trois salles : une salle de cours équipée d'un ordinateur et d'un vidéoprojecteur, où avaient été également installés une petite bibliothèque et des panneaux d'affichage, une salle de TP où manipulaient les étudiants et une salle d'instrumentation où étaient effectuées les analyses IRTF, CPG et CPG-SM.

Pour plus de facilité, un réseau informatique a été mis en place afin de pouvoir rendre disponibles tous les spectres et chromatogrammes obtenus. L'ordinateur gérant l'IRTF et celui de la CPG-SM possédaient des répertoires partagés ouverts sur plusieurs ordinateurs du réseau sur lesquels avaient été installés les banques de données, les bibliothèques de recherche permettant de faciliter les interprétations, ainsi que les logiciels de traitement<sup>(4)</sup>.

Dans la salle de cours, une petite exposition présentant des objets issus de fouilles archéologiques avait été organisée. Une conférence spécialisée a également été présentée afin d'expliquer aux étudiants en quoi consistaient les activités de recherche à l'interface de la chimie et de l'archéologie.

Chaque groupe devait tenir un cahier de laboratoire et y consigner les opérations réalisées : essais, réussis ou non, conditions, quantités de matière obtenue et résultats<sup>(5)</sup>. Toute analyse devant pouvoir être utilisée par n'importe quel autre groupe, les spectres et chromatogrammes étaient rassemblés sur un panneau d'affichage, les résultats pouvaient donc être facilement comparés aux spectres et chromatogrammes de référence présents dans la thèse de Martine Regert et de ses diverses publications.

## Résultats

### La cire d'abeille

Les produits de la ruche, tels le miel ou la cire, ont occupé une place importante dans la société humaine au moins

## Encadré 1

## Un mot sur les techniques

## L'analyse infrarouge

Tombée en désuétude au profit d'autres techniques analytiques telles la spectrométrie de masse (SM) ou de résonance magnétique nucléaire (RMN), l'analyse infrarouge (IR) qualitative revêt un intérêt de premier ordre dans l'univers de l'archéochimie. En effet, faiblement destructive et simple à mettre en œuvre, elle permet de classer très rapidement les échantillons analysés selon leur nature organique ou minérale. De plus, certaines bandes caractéristiques permettent de déceler la ou les familles de molécules composant l'échantillon. D'après les documentations fournies, les bandes d'absorption associées à la cire d'abeille se situent vers  $1720\text{ cm}^{-1}$  et vers  $720\text{ cm}^{-1}$  – doublet caractéristique des liaisons C-H des structures à longues chaînes. Plusieurs tests ont été effectués afin d'obtenir les spectres qui pourront le mieux caractériser la cire. Le dépôt de cire sur pastilles NaCl est la méthode de préparation qui a été retenue, pour une meilleure visualisation du doublet vers  $720\text{ cm}^{-1}$  (voir *figure a*). Cette analyse est une première étape qui, au vu des résultats, va éventuellement orienter l'archéochimiste vers d'autres analyses plus poussées comme la CPG et la CPG-SM.

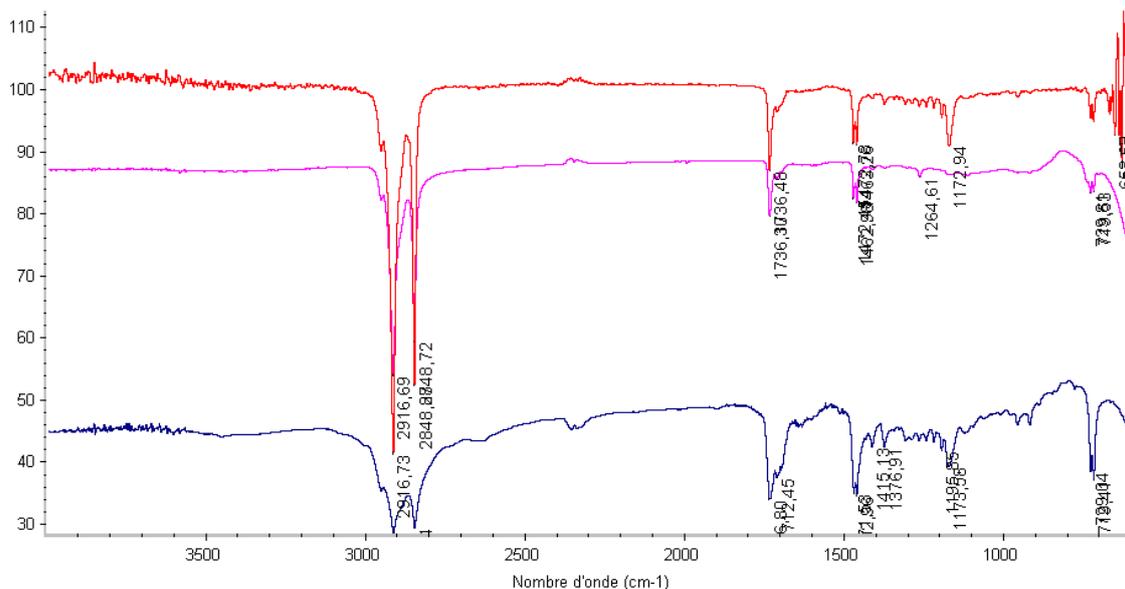


Figure a - Spectre IR-TF d'une cire récente.

En rouge : cire récente sur cellule ATR (« attenuated total reflectance ») ; en rose : cire récente sur pastille NaCl après dissolution dans  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  suivie d'une évaporation ; en bleu : cire récente déposée sur une pastille de NaCl.

## L'analyse CPG

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) a essentiellement permis de dégrossir le travail d'analyse des néo-archéologues. Les étudiants ont établi les profils chromatographiques de la cire (*figure b*) et du brai de bouleau. Les « fouilleurs » ont ainsi pu effectuer les analyses de leurs échantillons et déterminer en fonction des profils obtenus ceux nécessitant une analyse CPG-SM.

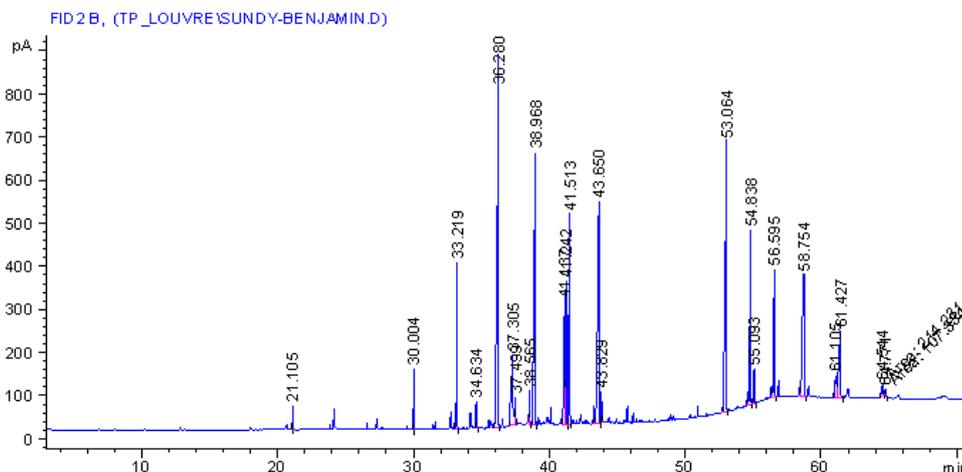


Figure b - Analyse CPG d'une cire contemporaine.

Ce chromatogramme met en évidence les massifs d'alcane ( $30\text{ min} < t < 45\text{ min}$ ) et les massifs d'esters ( $52\text{ min} < t < 65\text{ min}$ ).

## L'analyse CPG-SM

Bien souvent, l'IR et la CPG sont insuffisantes pour caractériser une cire d'abeille lorsqu'elle est mélangée à d'autres substances. On a alors recours à la chromatographie couplée à la spectrométrie de masse (CPG-SM) (figure c). Le matériel utilisé étant différent de celui mentionné dans les publications, une méthode d'analyse a dû être mise au point au préalable par des étudiants allemands en stage à l'ENCPB afin de définir les conditions de l'analyse couplée (débit de gaz, rampe de température, échantillonnage...). Cette méthode analytique nous a permis d'identifier les alcanes et les esters contenus dans une cire d'abeille actuelle.

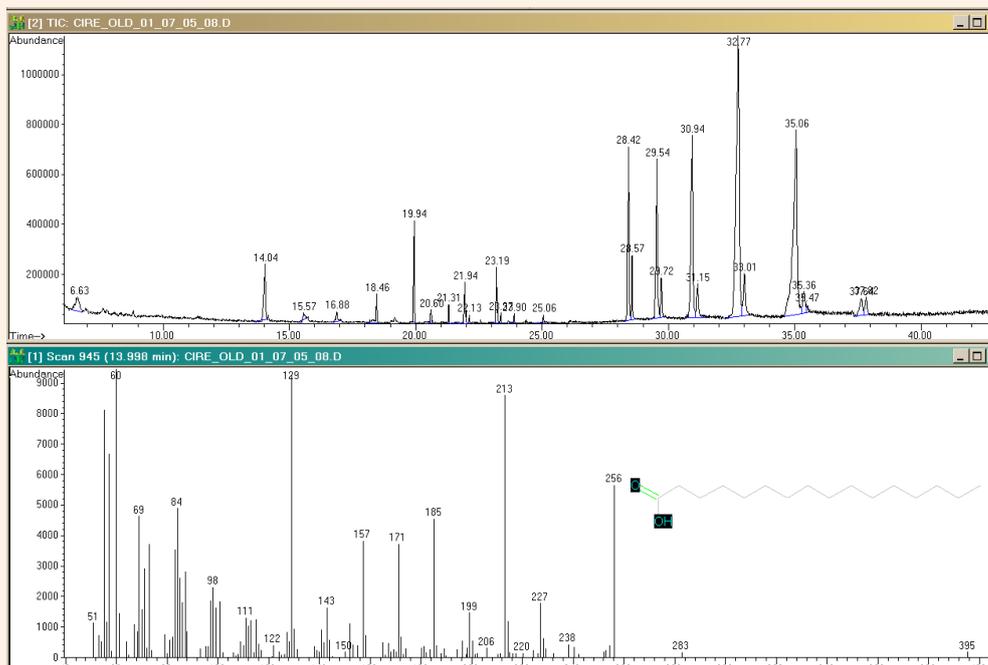


Figure c - En haut : analyse CPG-SM d'une cire vieillie par chauffage à 100 °C (échantillon prélevé sur le verre de montre) ; alcanes : 17 min < t < 23 min ; esters : 27 min < t < 33 min ; acide palmitique : 14 min. En bas : spectre de masse de l'acide palmitique.

dès le Néolithique, et ont été utilisés dans l'alimentation, la médecine, les rituels et un certain nombre d'activités techniques. Il arrive que l'on en retrouve sur des vestiges archéologiques, en particulier dans des récipients en céramique. De la cire d'abeille a ainsi été identifiée dans divers récipients, les plus anciens remontant au 6<sup>e</sup> millénaire avant notre ère. Parfois utilisée pure, elle est aussi retrouvée mélangée à des graisses animales ou à du brai de bouleau.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour étudier ces vestiges : microscope optique, détermination de température de fusion, spectroscopie IR et analyses CPG et CPG-SM (voir encadré 1). Dans un premier temps, l'analyse des cires contemporaines a permis de connaître leur composition : *n*-alcanes (alcanes linéaires) et esters essentiellement.

De la même manière que pour les cires contemporaines, l'étude des cires vieillies (voir encadré 2), artificiellement ou non, a donné lieu à plusieurs investigations. Le premier travail a été d'analyser l'évolution des constituants de la cire en fonction de l'environnement dans lequel elle a été conservée ou vieillie. Afin d'observer par analyse les différents phénomènes de dégradation, plusieurs simulations que l'on retrouve en contexte archéologique ont été effectuées :

- vieillissement photochimique sous lampe UV,
- vieillissement par voie sèche (simulant un environnement chaud et sec),
- vieillissement par voie humide en milieu légèrement basique pour accélérer le processus d'hydrolyse (simulant un environnement humide, par exemple lacustre ou fluvial).

Des analyses CPG-SM ont montré des profils différents selon le traitement subi par la cire<sup>(3)</sup>.

## L'écorce et le brai de bouleau

Le brai de bouleau est un goudron végétal fabriqué par traitement thermique contrôlé d'écorce de bouleau exploité par l'Homme depuis plus de 40 000 ans. À l'instar du bitume au Proche-Orient, il a d'abord été utilisé pour emmancher des outils lithiques, puis son usage s'est amplifié dans le courant du Néolithique et il a alors également servi à réparer, décorer ou étanchéifier des récipients en céramique. L'écorce de bouleau contient de la lignine, de la cellulose et de la subérine comme toutes les écorces, mais aussi des biomarqueurs spécifiques : des triterpènes tels que le lupéol et la bétuline (voir figure 4). Notons que lors de la préparation du brai qui s'obtient par pyrolyse, ces biomarqueurs subissent une réaction de déshydratation et diverses modifications chimiques. Les étudiants ont essentiellement utilisé la CPG-SM pour identifier les molécules caractéristiques de l'écorce et du brai de bouleau.

### Encadré 2

#### La cire d'abeille : composition

La cire d'abeille est majoritairement constituée d'esters et de *n*-alcanes (alcanes linéaires). Les esters que l'on retrouve en grande quantité sont dérivés de l'acide palmitique. L'analyse d'une cire vieillie en milieu humide nous révèle des pics d'acide palmitique et d'alcools résultant de l'hydrolyse des esters :



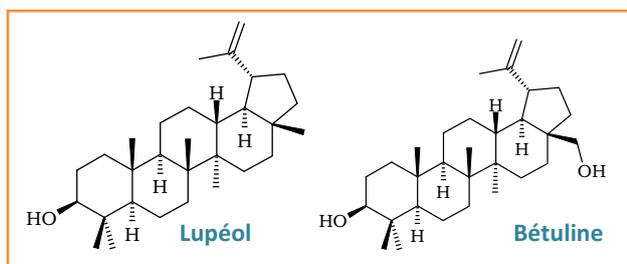


Figure 4 - Exemple de triterpènes présents dans l'écorce de bouleau.

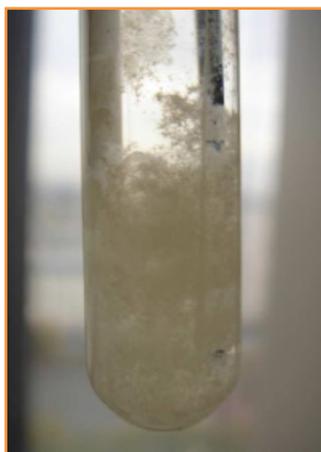


Figure 5 - Cristallisation de la bétuline dans les fractions issues de la colonne.

Afin d'identifier les biomarqueurs de l'écorce, une extraction au Soxhlet a été réalisée avec du dichlorométhane. L'analyse par CPG-SM a permis d'identifier plusieurs triterpènes comme le lupéol, la bétuline et la lupénone.

### Préparation de références : extraction du lupéol et de la bétuline

Un groupe s'est chargé de mettre au point une extraction sélective de marqueurs du brai de bouleau (lupéol et bétuline) afin d'obtenir des standards pour l'analyse. En effet, ces standards sont commercialisés mais coûtent chers.

Cette mise au point s'est faite sur les deux séances, en utilisant des méthodes d'extraction comme l'hydrodistillation ou un extracteur de Soxhlet (en essayant plusieurs solvants). Une fois l'extraction réalisée, il fallait procéder à la mise au point de la séparation sur colonne en vue d'une purification.

Les étudiants se sont donc attachés à extraire et purifier le lupéol et la bétuline à partir d'écorce de bouleau. Ils n'avaient pour seule source qu'un article du *Journal of Chemical*



Figure 6 - Exemples de poteries extraites du chantier de fouille expérimental.

*Éducation* [5], décrivant une réaction sur la bétuline, mais sans le protocole de purification. Ils ont adapté le protocole d'extraction et à leur grande satisfaction, ils ont obtenu ce qu'ils cherchaient lors de la deuxième séance. Après deux criblages d'éluants de CCM et transposition sur colonne, ils ont mis au point une élution sur colonne de silice permettant la cristallisation de la bétuline (figure 5) et du lupéol dans les tubes de récupération (résultats disponibles auprès des auteurs<sup>(3)</sup>).

## Le chantier de fouille

Après quelques explications sur l'art et la manière de mener des fouilles (analyser strate par strate, carroyer la surface, gratter sans abîmer, nettoyer au pinceau, numéroter les échantillons, prendre des photos avec des points de repères, etc.), un des groupes a eu pour mission d'extraire du sédiment plusieurs tessons de poteries (issus de pots de fleur achetés dans le commerce) (figure 6). Après une analyse visuelle rapide, certains fragments ont été broyés au mortier et analysés selon les méthodes utilisées par les groupes « cire d'abeille » et « brai de bouleau ».

L'analyse de deux échantillons provenant de la fouille expérimentale montre la présence de cire d'abeille et d'huile végétale dans l'un (13-M3) (figure 7a) et de brai de bouleau

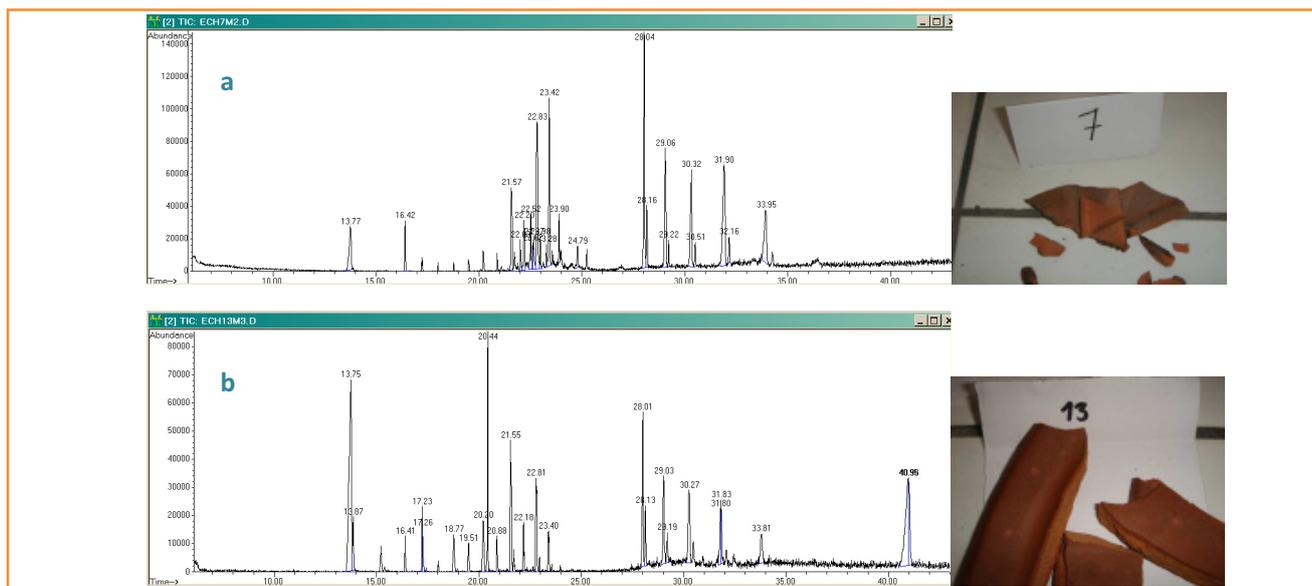


Figure 7 - CPG-SM de l'échantillon 13-M3 (a) et 7-M2 (b).

(a) Les analyses ont mis en évidence la présence de brai de bouleau (massif à  $t \sim 22$  min) et de cire d'abeille (alcane à 25 min >  $t > 16$  min ; esters à 33 min >  $t > 27$  min). Le pic à 13,77 min correspond à l'acide palmitique issu de l'hydrolyse des esters ; cette information permet d'avancer l'hypothèse d'une dégradation en milieu humide.  
(b) Les analyses mettent en évidence la présence de cire d'abeille (alcane à 25 min >  $t > 16$  min ; esters à 33 min >  $t > 27$  min), ainsi qu'une huile végétale ( $t = 13,75$  min acide oléique et  $t = 40,96$  min triglycéride).

et de cire d'abeille dans l'autre (7-M2) (figure 7b) (analyses détaillées disponibles auprès des auteurs<sup>(3)</sup>).

## Conclusion

Après ces deux séances de TP, nous pouvons tirer un bilan très positif de tout ce qui a été accompli. Ce projet, qui a nécessité beaucoup de préparation pour sa mise en place, a rencontré un franc succès auprès des étudiants. Malgré les difficultés scientifiques, leur implication a été totale et nous avons réussi à obtenir un grand nombre de résultats exploitables, souvent conformes à ceux attendus. De plus, ces deux journées ont aussi été l'occasion de faire découvrir un lien fort entre chimie et archéologie, et ce, grâce à la présence et à la disponibilité de Martine Regert qui n'aura pas hésité à donner de son temps pour expliquer ses travaux de recherche, présenter des objets archéologiques lors de mini conférences improvisées à des élèves et à des professeurs très curieux de découvrir cette facette méconnue et pourtant si intéressante de la chimie<sup>(6)</sup>.

## Remerciements

Nous tenons à remercier en particulier Erwan Beauvineau, Anthony Bourgeois, Dominique Marcaillou, Christiane Parent, Katia Riché et Anne Schnäbele pour l'intérêt et/ou l'aide qu'ils ont pu porter à notre travail. Merci également aux stagiaires allemands – Kurstin, Swenia, Sven, Thomas et Wolfram – de chez Provalidis qui nous ont aidés à mettre au point les analyses chromatographiques. Ces séances n'auraient jamais pu être réalisées sans l'implication de Filip Decaster et Franck Xavier.

## Notes et références

- (1) Classe de BTS-chimiste 2<sup>e</sup> année, TS<sub>2</sub>CB, promotion 2008/2009, ENCPB-Lycée Pierre-Gilles de Gennes, 11 rue Pirandello, Paris 13<sup>e</sup>.
- (2) Le chantier expérimental de fouille a été préparé à partir de pots en terre cuite contemporains que nous avons imprégnés, selon les cas, de cire, d'huile d'olive et de brai de bouleau en les plaçant en étuve (voir figure 3). Ces pots ont été disposés dans un bac et couvert de terre fortement tassée.
- (3) L'ensemble des résultats est disponible auprès de Xavier Bataille (xavierbataille@free.fr).
- (4) Matériel d'analyse utilisé : spectroscope infrarouge à transformée de Fourier (Avatar 320 FT-IR, Thermo Nicolet), chromatographe en phase gazeuse (CPG : Agilent 6890N ; injecteur split/splitless ; gaz vecteur H<sub>2</sub> ; colonne HP 5 ms 30 m 0,25 mm 0,25 µm ; sous GC-Chemstation, détecteur FID), chromatographe en phase gazeuse (colonne 15 m) couplé à un spectromètre de masse à quadripôle (Quadripôle Agilent 5973N ; CPG : Agilent 6890N ; injecteur split/splitless ; gaz vecteur H<sub>2</sub> ; colonne HP 5 ms 15 m 0,25 mm 0,25 µm ; sous Chemstation). Analyse et traitement des données à l'aide des logiciels WSearch (Frank Antolasic, RMIT Chemistry, Victoria, Australie, 2005, www.wsearch.com.au, fichiers au format \*.MS), couplés à la base de données de spectrométrie de masse NIST.02 (www.nist.gov/srd/nist1.htm), Chemstation (Agilent, www.chem.agilent.com, fichiers TIC (Total Ion Chromatogram) au format \*.D), NIST MS Search Software et MS Interpreter (www.ms-interpreter.com, NIST, 2006), OMNIC (Thermo Scientific : www.thermo.com). Pour la rédaction des comptes rendus : suite Open Office 3.0 (http://fr.openoffice.org), logiciel de capture d'écran CAPTURINO v2.0 (www.capturino.com), structures moléculaires : ChemsSketch (www.acdlabs.com v.11) et ISISDRAW (www.mdli.com).
- (5) Notons que le cahier de laboratoire constitue un support important pour le groupe continuant les expériences la semaine suivante. Les étudiants prennent conscience en le rédigeant de l'importance des détails qui doivent y être mentionnés.
- (6) Signalons que Martine Regert a déjà publié plusieurs articles dans *L'Actualité Chimique*, dont ceux cités dans les références [1] et [3].
- [1] Regert M., Des chasseurs de miel néolithiques aux sculpteurs du XIX<sup>e</sup> siècle, *L'Act. Chim.*, **2008**, 318, p. 52 ; Regert M., Les matériaux organiques amorphes en préhistoire : présentation, méthodes d'étude et implications archéologiques, *Le Bup*, **2000**, 827, p. 1581.

- [2] Regert M., *Les composés organiques en préhistoire : nouvelles approches analytiques*, Thèse d'université, Paris 10, 1996.
- [3] Regert M., Produits de la ruche, produits laitiers et matières végétales : quels vestiges pour appréhender les substances naturelles exploitées par l'homme pendant la préhistoire ?, *Les cahiers de l'OCHA* (Observation Cidil des Habitudes Alimentaires), **2007**, 12, p. 30 ; Regert M., Langlois J., Ciollinart S., Characterisation of wax works of art by gas chromatographic procedures, *J. Chrom. A*, **2005**, 1091, p. 124 ; Regert M., Guerra M.-F., Reiche I., Physico-chimie des matériaux du patrimoine culturel, *Techn. Ing.*, **2006**, P3780, p. 1 et P3781, p. 1 ; Regert M., Ciollinart S., Degrand L., Decavallas O., Chemical alteration and use of beeswax through time: Accelerated ageing tests and analysis of archaeological samples from various environmental contexts, *Archaeometry*, **2001**, 43(4), p. 549 ; Garnier N., Cren-Olivé C., Rolando C., Regert M., Characterization of archaeological beeswax by electron ionization and electrospray ionization mass spectrometry, *Anal. Chem.*, **2002**, 74, p. 4868 ; Regert M., Delacotte J.M., Menu M., Pétrequin P., Rolando C., Identification of neolithic hafting adhesives from two lake dwellings at Chalain (Jura, France), *Ancient Biomolecules*, **1998**, 2, p. 81 ; Regert M., Garnier N., Binder D., Pétrequin P., Les adhésifs néolithiques : quels matériaux utilisés, quelles techniques de production dans quel contexte social ? Actes des XX<sup>e</sup> Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes « Arts du feu et productions artisanales », oct. 1999, **2000**, p. 586 ; Regert M., Vacher S., Moulherat C., Decavallas O., Study of adhesive production and pottery function during iron age on the site of Grand Aunay (Sarthe, France), *Archaeometry*, **2003**, 45, p. 101 ; Regert M., Rolando C., Identification of archaeological adhesives using direct inlet electron ionization mass spectrometry, *Anal. Chem.*, **2002**, 74, p. 965 ; Bonaduce I., Colombini M.P., Characterization of beeswax in works of art by gas chromatography-mass spectrometry procedures, *J. Chrom. A*, **2004**, 1028, p. 297 ; Lattuati-Derieux A., Egasse C., Regert M., Chung Y.-G., Lavédrine B., Characterization and degradation pathways of ancient Korean waxed papers, *J. Cult. Herit.*, **2009**, 10, p. 422 ; Regert M., Du défi analytique aux interprétations archéologiques : caractérisation des substances organiques piégées dans les poteries préhistoriques, *L'Act. Chim.*, **2011**, 353-354, p. 119 ; Regert M., Analytical strategies for discriminating archaeological fatty substances from animal origin, *Mass Spectrom. Rev.*, **2011**, 30(2), p. 177 ; Bui Thi Maï, Courtaud P., Dumontier P., Girard M., Mirabaud S., Regert M., Analyse du contenu de vases déposés en contexte sépulcral au Bronze ancien et moyen dans les grottes de Droundak et Homme de Pouey (Pyrénées Atlantiques), Actes des 8<sup>e</sup> Rencontres Méridionales de Marseille, 7 et 8 nov. 2010, **2011**, p. 449.
- [4] Voir par exemple : Bataille X., Beauvineau E., Cheymol N., Mas V., Vigneron M., Un TP de chimie analytique en séquence d'investigation, *L'Act. Chim.*, **2009**, 333, p. 42.
- [5] Green B., Bentley M.D., Chung B.Y., Lynch N.G., Jensen B.L., Isolation of betulin and rearrangement to allobetulin: A biomimetic natural product synthesis, *J. Chem. Educ.*, **2007**, 84, p. 1985.



X. Bataille



C. Bazot



R. Galera

Xavier Bataille (auteur correspondant) est professeur et Caroline Bazot est professeure attachée de laboratoire à l'ENCPB<sup>(1)</sup>.

Robert Galera est professeur au lycée Fénélon<sup>(2)</sup>.

Martine Regert est directrice de recherche au CNRS<sup>(3)</sup>.



M. Regert

(1) ENCPB, 11 rue Pirandello, F-75013 Paris.

Courriel : xavierbataille@free.fr

(2) Lycée Fénélon, 2 rue de l'Éperon, F-75006 Paris.

(3) UMR 7264 UNS-CNRS, CEPAM (Cultures et Environnements, Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge). Campus de SJA3, 24 avenue des Diables bleus, F-06357 Nice Cedex 4.