

# Matières colorantes de l'Alexandrie hellénistique : de la fouille au laboratoire

Valérie Pichot, Jean-Marc Vallet, Nicolas Bouillon, Odile Guillon et Monique Pomey

*Valérie Pichot est archéologue au Centre d'Études Alexandrines (CEAlex<sup>1</sup>), et Jean Marc Vallet est chercheur au laboratoire du Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine (CICRP<sup>2</sup>).*

*L'équipe qui a réalisé l'ensemble de travaux présentés était constituée, outre de Valérie Pichot et Jean-Marc Vallet, de Nicolas Bouillon (CICRP), Odile Guillon (CICRP) et Monique Pomey (restauratrice indépendante).*

Le programme des matières colorantes, toujours en cours d'étude, fut un des

déclencheurs de la création du laboratoire de caractérisation des matériaux au Centre d'Études Alexandrines (CEAlex) et illustre bien la

1. [www.cealex.org](http://www.cealex.org)

2. <https://cicrp.info/>



**Figure 1**

Le lac Mariout, ancienne lagune caractérisant le paysage de la région d'Alexandrie.

Source : CEALex, CNRS.

nécessité de l'évolution transdisciplinaire de l'archéologie moderne.

## 1 Découverte archéologique : de la fouille à l'étude

En 2007, la campagne de fouilles menée par le CEALex sur l'île de Maréa à une quarantaine de kilomètres au sud-ouest d'Alexandrie, a mis au jour des enduits peints, encore partiellement en place, dans la salle Nord de la maison-tour orientale, datée du II<sup>e</sup> siècle avant J.-C. Ce site est localisé le long de la rive méridionale du lac Mariout, ancienne lagune qui caractérise la campagne de

l'Alexandrie antique (**Figure 1**) et autour de laquelle se sont installés de nombreux sites aux périodes hellénistique et romaine (**Figure 2**).

### 1.1. Contexte environnemental

L'environnement de ces sites est saumâtre et influe sur le travail archéologique : les conditions de fouille et l'état de conservation du mobilier archéologique sont fortement impactés par cet environnement (nappe phréatique très haute et à forte fluctuation, proximité du lac saumâtre). Les conditions climatiques (chaleur et humidité) de cette région proche de la mer et située aux portes du désert tiennent aussi une part importante dans les problèmes inhérents à la fouille.

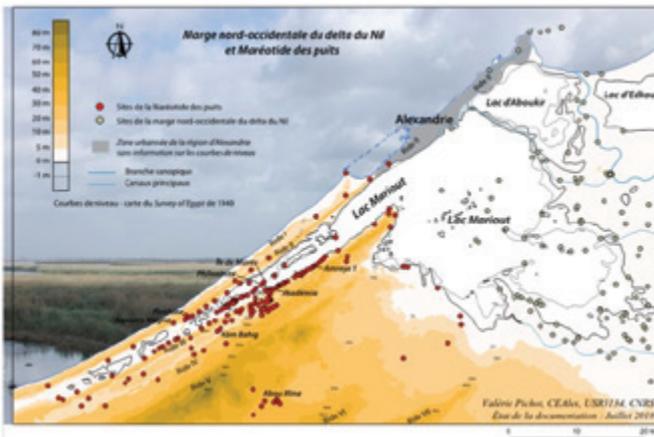
### 1.2. Contexte archéologique

Cette découverte était inattendue car aucun vestige de ce type n'avait encore été trouvé sur ce site pourtant fouillé depuis 2003 : le site, abandonné à la fin du Haut-Empire, a subi une vaste destruction pendant l'Antiquité tardive pour la récupération

**Figure 2**

Les sites archéologiques de la campagne d'Alexandrie.

Source : CEALex, CNRS.





**Figure 3**

Vestiges de la maison-tour orientale de l'île de Maréa.

Source : CEALex, CNRS.

de matériaux ainsi qu'une détérioration naturelle des structures archéologiques par l'action des tempêtes d'hiver et des vents de sable non négligeables dans cette région.

La maison-tour est un édifice composé de murs imposants dont les premières assises sont en pierres calcaires (Figure 3) et sur lesquelles se développent de hauts murs en briques crues. Les enduits peints en place concernent les parties basses des élévations en pierre ; le reste des enduits a été retrouvé dans l'effondrement des murs en briques crues à l'intérieur de la salle nord (Figure 4).

### 1.3. Contexte de fouille

Dans le cadre de ce type de fouilles, qui s'effectue sur un temps court et limité, toute la difficulté réside dans le traitement des données de terrain et du mobilier, tout en continuant la fouille sans détruire d'informations. Cela implique de sortir l'intégralité des enduits peints avant leur dépose, sans sacrifier les couches archéologiques qui les recouvrent, afin d'atteindre un niveau



**Figure 4**

La salle Nord de la maison-tour possédait des enduits peints que l'on retrouve dans la partie effondrée.

Source : CEALex, CNRS.



Figure 5

Dégagement des enduits peints en place et des fragments dans l'effondrement des murs en briques crues, avant l'intervention des restaurateurs.

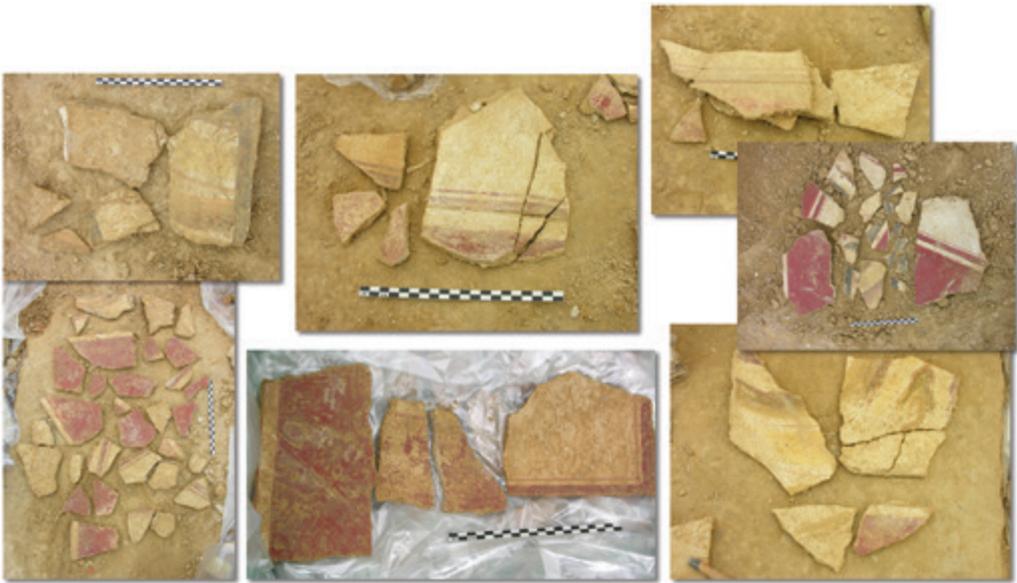
Source : CEALex, CNRS.



Figure 6

Intervention des restaurateurs : traitement, consolidation et dépose. La protection des enduits peints est essentielle au cours de leur dégage- ment.

Source : CEALex, CNRS.



relativement peu fragile (**Figure 5**) pour permettre le travail des restaurateurs pour le traitement, la consolidation et la dépose des enduits, sans détruire les données archéologiques.

Le temps de dégagement est plus ou moins long suivant la complexité du site et la taille des structures fouillées. Dans un environnement comme celui de l'île de Maréa, la chaleur, l'humidité et le soleil posent très rapidement des problèmes de remontées des sels à la surface des enduits. L'urgence était donc de protéger au mieux, pendant le temps de leur dégagement, les enduits peints en place de l'action directe du soleil (**Figure 6**).

En parallèle, tous les fragments d'enduits découverts dans l'effondrement des murs ont été numérotés et stockés à plat dans des caisses déposées dans un petit local jusqu'à la fin de la fouille et traités

dès leur arrivée au dépôt de fouille à Alexandrie à la fin de la mission.

On voit sur la **Figure 7** ces fragments d'enduits qui viennent d'être trouvés et récupérés dans l'effondrement des murs.

#### 1.4. L'apport de la vision d'un conservateur-restaurateur

En 2010 l'étude de ces enduits peints, par Monique Pomey, restauratrice spécialisée dans les peintures, a permis de montrer l'intérêt d'effectuer une étude approfondie de ce dossier tout en abordant la question de la restauration pour une conservation pérenne des enduits liée au problème des sels.

Certains fragments montrent l'intégralité de la succession de six couches d'enduits appliquées depuis le mur jusqu'à la couche picturale, technique de fabrication rappelant les

**Figure 7**

*Fragments d'enduits peints découverts dans l'effondrement des murs en briques crues de la salle Nord.*

Source : CEALex, CNRS.



**Figure 8**

Morceaux d'enduits peints  
provenant de la maison-tour de  
l'île de Maréa. Mission mai 2010  
- M. Pomey, restauratrice et  
V. Pichot, archéologue.

Source : CEALex, CNRS.

recettes de Vitruve<sup>3</sup>, architecte romain du 1<sup>er</sup> siècle avant J.-C. - début du 1<sup>er</sup> siècle après J.-C. D'autres fragments montrent les surfaces de différentes couches avec des traces d'adhérence et certains revers portent les traces de mur. Le corpus des fragments montre une large diversité des couleurs utilisées (Figure 8).

Au moment de la découverte, la question avait été de savoir si tous les enduits retrouvés à l'intérieur des effondrements des murs en briques crues étaient des fragments provenant des enduits peints

du rez-de-chaussée, ou s'il s'agissait en partie d'un décor qui se trouvait au premier étage, et qui aurait été pris dans l'effondrement des murs.

Un essai de remontage lors d'une deuxième mission en 2012 a permis d'avoir une vision globale de la disposition du décor (Figures 9 et 13) et de confirmer que tous les fragments provenaient bien de la décoration du rez-de-chaussée.

### 1.5. Le besoin en analyse des matériaux

Le problème des sels et de la conservation des enduits et de leur couleur (Figure 10), ainsi que l'intérêt du dossier comportant de multiples questions sur les techniques de fabrication, ont entraîné naturellement la question des analyses et le constat que celles-ci étaient nécessaires dans l'étude du dossier.

La réglementation égyptienne applicable ne permettant pas

3. Vitruve explique entre autres que, pour fabriquer des enduits peints, une succession de six couches doit être apposée et que plus on s'approche de la couche picturale plus l'enduit doit être fin. Il décrit précisément ces couches. Mais rien ne prouve, pour le moment, que les enduits de l'île de Maréa et leurs six couches correspondent parfaitement à la recette de Vitruve. Des observations et analyses couche par couche doivent être effectuées afin de pouvoir confirmer ou non ce point.



**Figure 9**

Remontage des enduits peints du rez-de-chaussée de la maison-tour. Mission 2012 – M. Pomey, restauratrice et V. Pichot, archéologue.

Source : CEALex, CNRS.



**Figure 10**

Les enduits traités à leur sortie de fouille sont attaqués par les sels. Quelques exemples de terres cuites figurées de l'époque hellénistique provenant du site de l'île de Maréa.

Source : CEALex, CNRS.



**Figure 11**

*Un pigment analysé par analyse chimique et imagerie.*

Source : CICRP.



**Figure 12**

*Une statuette de Bès analysée par analyse chimique et imagerie.*

Source : CEALex, CNRS.

d'exporter des échantillons à caractère archéologique, toutes les analyses doivent être réalisées sur le territoire national. Cette contrainte légale entraîne certaines difficultés dans les études menées, que ce soit du point de vue de l'accès aux moyens analytiques appropriés ou de celui de vérifier la validité de résultats, fournis par des scientifiques qui ne seraient pas familiers des problématiques d'archéométrie<sup>4</sup> ou de conservation.

La collaboration entre le CEALex et le CICRP est née de ce besoin d'analyse. En 2012, une première mission à Alexandrie de l'équipe du CICRP a permis les premières analyses sur le dossier des enduits qui s'est vu élargi aux terres cuites figurées hellénistiques provenant du même site, ainsi qu'aux pigments bruts découverts sur les sites alexandrins fouillés par le CEALex, large panel des couleurs utilisées pendant l'Antiquité.

À cette époque, le laboratoire de caractérisations des matériaux du CEALex était encore à l'état embryonnaire et ne disposait que d'une binoculaire, de deux microscopes métallographiques<sup>5</sup> et d'un équipement de micro-fluorescence X portable. Pour les besoins de cette première mission préliminaire, un spectromètre

d'émission optique de plasma induite par laser (LIBS<sup>6</sup>) et un équipement pour réaliser un dossier d'imagerie technique ont été apportés de France.

## 2 Analyses archéométriques

### 2.1. Méthodes d'analyses et spécificités du contexte alexandrin

L'objectif de cette première mission était d'identifier les spécificités de l'étude des objets archéologiques dans le contexte alexandrin liées entre autres à l'état de conservation, aux problèmes de pulvérencence et de stockage. Il s'agissait plus précisément de définir les éventuels traitements à effectuer, pour évaluer l'apport des différentes méthodes d'analyse, et mettre au point un protocole pour leur mise en œuvre, tout en réfléchissant aux moyens nécessaires à la mise en place d'une structure mobile utilisable sur site.

Le but final était aussi de dégager des perspectives à plus long terme en termes de mises en place d'analyses archéométriques et de moyens de conservation, à Alexandrie, voire en Égypte.

Les premières analyses ont porté sur une douzaine pigments (**Figure 11**), six fragments d'enduits peints et cinq statuettes et autres figurines en terre cuite (**Figures 12 et 13**).

4. Archéométrie : désigne toutes les recherches visant à appliquer des techniques scientifiques au domaine archéologique, pour obtenir des mesures.

5. Microscope métallographique : microscope permettant l'étude des microstructures des métaux visibles à leur surface.

6. LIBS (spectrométrie d'émission optique de plasma induit par laser) : technique d'analyse chimique élémentaire entièrement optique sans contact avec l'échantillon.

Le contexte analytique était assez éloigné des standards que l'on peut rencontrer dans un laboratoire ou dans un studio photo comme on peut le voir sur la **Figure 14**. Il a fallu travailler dans un dépôt de fouilles et trouver des solutions techniques parfois un peu compliquées pour s'y adapter.

Nous avons utilisé l'imagerie multi-bandes, qui est un ensemble d'images photographiques réalisées avec des lumières dans différents domaines de longueurs d'onde, domaines du visible, des ultraviolets (UV) et du proche infrarouge (**Figure 15**). Les prises de vue sont tout d'abord faites en lumière directe et en lumière semi-rasante pour regarder les reliefs.

Pour les photos d'émission dans le domaine du visible, de fluorescence de certains matériaux organiques ou inorganiques sous un rayonnement UV, nous avons utilisé comme source de lumière des tubes UV, prêts par le CEALex et supposés émettre entre 350 et 400 nm.

La prise de vue en privilégiant le rayonnement émis en lumière infrarouge apporte des informations différentes et complémentaires. Pour la réaliser il suffit d'ôter le filtre de l'appareil photo puisque les capteurs numériques captent naturellement les infrarouges. On obtient ainsi une image qui est généralement traitée en noir et blanc mais qui, avec certains capteurs, peut être un peu colorée. Et on peut aussi, en combinant cette image infrarouge avec une image normale, avoir une imagerie en infrarouge fausse couleur,



**Figure 13**

Ensemble de fragments d'enduits peints, en cours d'assemblage pour reconstituer le décor initial.

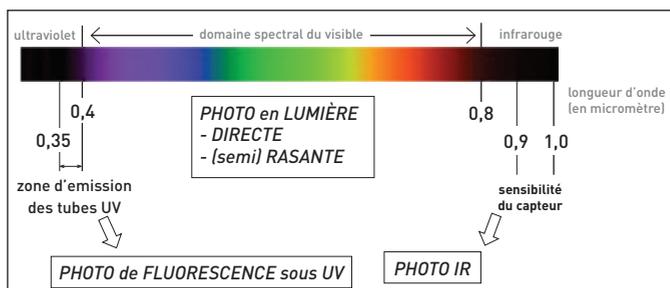
Source : CEALex, CNRS.



**Figure 14**

Exemple d'installation de travail dont les conditions sont plutôt difficiles dans le dépôt de fouilles.

Source : CICRP.



**Figure 15**

Spectre électromagnétique avec les différentes longueurs d'onde utilisées dans l'imagerie multi bande.

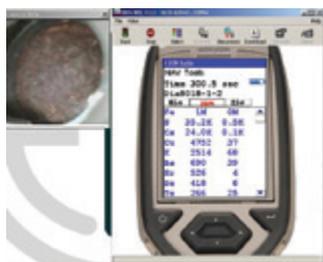
Source : CICRP.



**Figure 16**

Échantillon prêt à être analysé par la micro-spectroscopie de fluorescence X du CEAlex.

Source : CICRP.



**Figure 17**

Exemple de résultats obtenus par micro-spectroscopie de fluorescence X.

Source : CICRP.

qui donnera aussi de nouvelles informations sur la nature des matériaux présents.

L'analyse chimique élémentaire a été réalisée avec deux types d'équipements. Un équipement de micro-spectroscopie de fluorescence X (Figure 16), où l'excitation des atomes est faite par des rayons X et est alors analysé le spectre d'émission de fluorescence X. Quand l'énergie d'excitation est faible, les éléments légers sont détectés, et plus l'énergie d'excitation est importante, plus on détecte des éléments chimiques lourds. Néanmoins les conditions d'analyses utilisées ne permettent pas de détecter les éléments plus légers que le magnésium. C'est une technique de contact avec une surface d'analyse de 3 ou 8 mm. L'analyse réalisée est qualitative (Figure 17).

L'analyse élémentaire par spectroscopie d'émission optique sans contact a été réalisée avec un équipement

LIBS qui permet de générer un plasma sous l'impact d'un faisceau laser néodyme-YAG<sup>7</sup> (Figure 18) sur la surface du matériau ; trois spectromètres analysent la lumière émise par l'échantillon, ce qui permet de détecter un plus grand nombre d'éléments chimiques. Les éléments légers comme le sodium sont visibles avec le LIBS, alors qu'ils ne sont pas par spectroscopie de fluorescence X. Cependant d'autres éléments comme les halogènes (par exemple le soufre, le chlore) ne sont pas ou sont difficilement détectés. Cette technique de mesure est instantanée. Sur chaque zone analysée ont été réalisées dix analyses, chacune correspondant à un plasma généré à chaque impulsion laser. Le premier « tir » n'est pas pris en compte car le matériau vaporisé correspond aux dépôts de surface (poussières) sur les objets d'étude. Une valeur moyenne peut alors être calculée lorsqu'une seule couche est analysée. La succession des tirs laser sur une même zone permet aussi dans certains cas d'avoir une

7. Laser néodyme-YAG : laser dont le milieu amplificateur est un cristal de grenat d'yttrium-aluminium (YAG) dopé au Néodyme. Il émet un rayonnement à 1064 nm.

**Figure 18**

Appareil LIBS utilisés pour des analyses sans contact des objets de fouille.

Source : CICRP.



stratigraphie des différentes couches superposées. De nombreux spectres ont été réalisés lors de cette campagne (562 spectres) pour avoir une vision correcte de la composition de chaque objet analysé.

## 2.2. Archéométrie des pigments

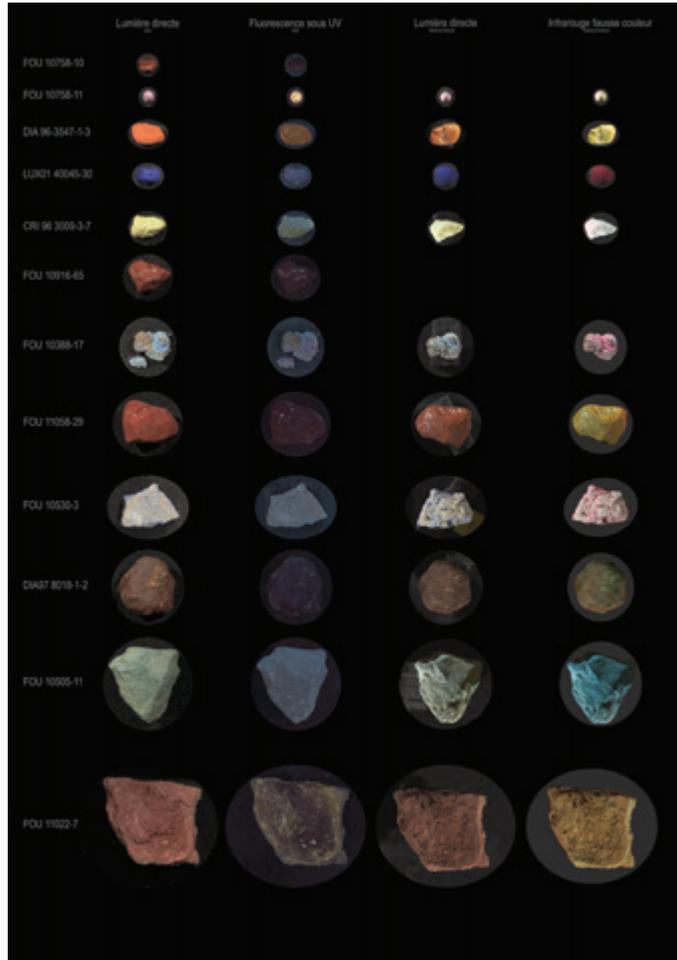
Les images de l'analyse des pigments par imagerie multi-bande sont reportées sur la **Figure 19**.

L'objectif de l'étude était aussi d'établir un référentiel de ces pigments pouvant servir de guide pour les analyses ultérieures d'objets ayant des traces de couleur. Les résultats ont été comparés aux référentiels existants du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) et du CICRP.

La **Figure 20** montre par exemple deux échantillons de pigments dont les images directes et en infra-rouge fausse couleur sont semblables, pour le minium<sup>8</sup> (**Figure 20A**), et pour l'ocre rouge (**Figure 20B**), à celles du référentiel du CICRP.

Un exemple des résultats de l'analyse par spectroscopie de fluorescence X de ces échantillons est reporté sur la **Figure 21**. Le spectre de ces pigments révèle notamment la présence de cuivre et de calcium attribuée à la présence d'un silicate de cuivre et de calcium, la cuprorivaïte, minéral constituant le « bleu égyptien ».

8. Minium : pigment de couleur rouge orangée et composé de tétraoxyde de plomb.



**Figure 19**

Résultats d'analyse par imagerie multi-bandes des pigments.

Source : CICRP.

La **Figure 22** donne le spectre obtenu par LIBS lors de l'analyse d'un pigment rose qui contient des atomes de calcium, de carbone, d'oxygène, d'aluminium et de potassium en proportions importantes ; le fer est aussi présent en faible concentration avec peut-être un peu de titane et du carbone.

La composition de ce pigment est difficile à déterminer : à partir de ces résultats on peut s'interroger sur la présence

Figure 20

Réponses, dans les encadrés à droite de l'image : A) du minium ; B) de l'ocre rouge, éclairés par la lumière du jour (lumière directe à gauche) et en imagerie infrarouge fausse couleur (droite). Ces réponses sont comparées à celles tirées du référentiel de couleurs du CICRP (dans les bandes blanches à gauche).

Source : CICRP.

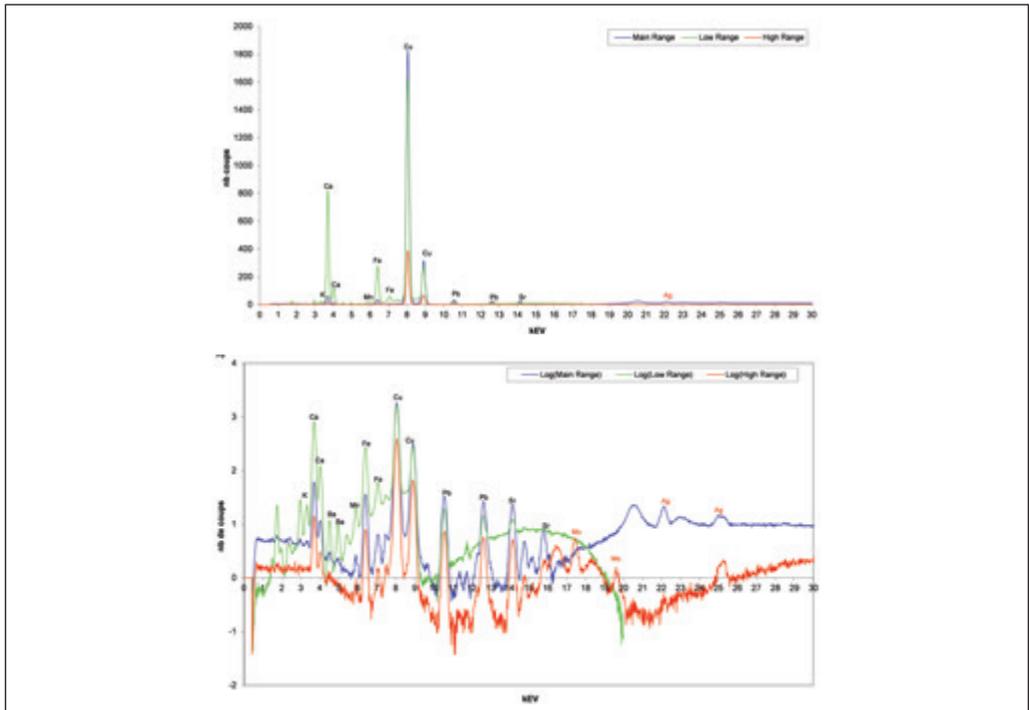
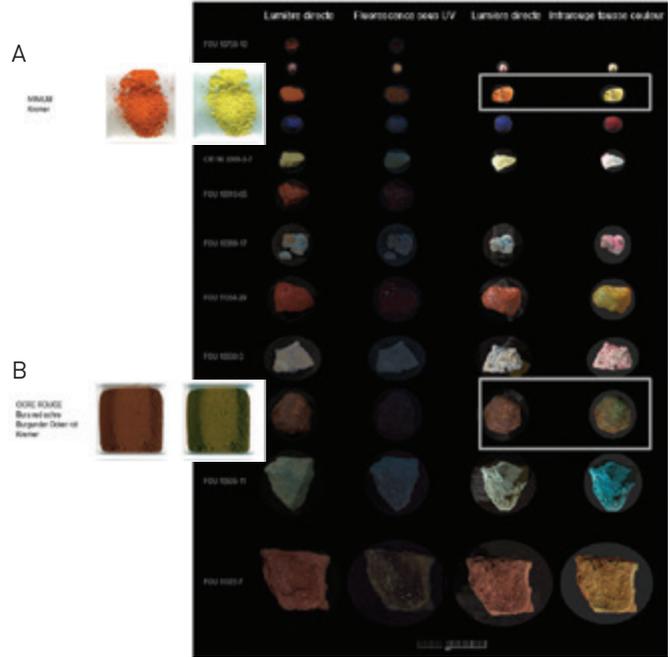
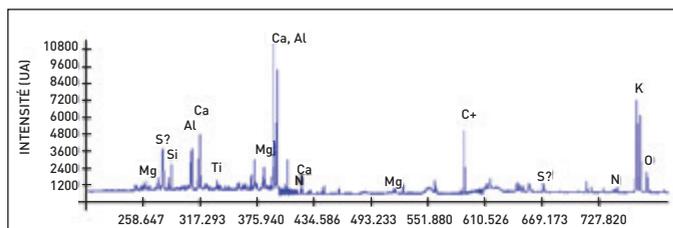


Figure 21

Spectres d'analyse par microfluorescence X d'un pigment bleu révélant la présence de bleu égyptien.

Source : CICRP.


**Figure 22**

Le spectre d'analyse LIBS d'un pigment rose révèle la présence de nombreux éléments chimiques (calcium, aluminium...) mais ne permet pas de savoir leur structure cristalline.

Source : CICRP.

de laque de garance<sup>9</sup> pouvant être mélangée à de l'hématite<sup>10</sup>.

L'analyse par imagerie de ce pigment rose qui se présente sous forme d'un cône et la détection de carbone et d'azote par analyse LIBS, attribués à la présence de matière organique, laissent à penser qu'il s'agirait plutôt de laque de garance (Figure 23), mais cela sera à confirmer par d'autres types d'analyse.

En effet, les analyses montrent d'une part la présence de fer, sans qu'il soit possible d'identifier sous quelle forme : différents minéraux peuvent en effet contenir du fer, et notamment l'hématite, qui est un des pigments rouges les plus connus. Mais comme de l'aluminium et du silicium sont aussi présents, cette couleur rouge pourrait être aussi due à la présence d'ocre rouge.

Par ailleurs, les analyses chimiques élémentaires réalisées par spectroscopie d'émission optique (LIBS) témoignent de la présence de matière organique, sans que l'on puisse cependant en déterminer la nature précise.

9. Laque de garance : teinture de couleur rouge obtenue à partir d'une plante de la famille des Rubiacées.

10. Hématite : oxyde de fer naturel, de formule  $Fe_2O_3$ , de couleur rouge.

Si l'on regarde l'intérêt de ces deux techniques d'analyses élémentaires pour l'archéométrie, la micro-spectroscopie de fluorescence X et le LIBS ont l'avantage commun d'être des appareils légers, portables et autonomes, avec comme avantage supplémentaire pour le LIBS, la possibilité de bien identifier la zone analysée et de faire des mesures instantanées, ce qui peut permettre de réaliser des analyses successives, et, par exemple sur des petites stratigraphies, de voir des variations de teneurs d'un élément chimique ou un autre. De plus, l'intérêt du LIBS est aussi que le premier tir peut permettre d'ôter les poussières et matériaux exogènes<sup>11</sup> qui sont sur l'échantillon et peuvent perturber l'interprétation.

Mais ces deux techniques ont aussi des limites qui sont :

- l'adéquation de la taille de la fenêtre d'analyse avec l'homogénéité de l'échantillon ; de plus, l'analyse au contact est, dans le cas de la micro-spectroscopie de fluorescence X, problématique lorsque les échantillons sont pulvérulents ou ne sont pas plats, comme les céramiques, les petites terres cuites ;
- un temps d'analyse relativement long en spectroscopie de fluorescence X ;

11. Exogène : qui provient d'un autre milieu, extérieur à l'objet initial.


**Figure 23**

La forme conique du pigment rose est un élément en faveur d'un matériau coloré par de la laque de garance, si l'on se réfère aux connaissances acquises par les archéologues.

Source : CICRP.

Figure 24

Les couleurs obtenues par infrarouge fausse couleur ne correspondent pas au référentiel, il n'est pas possible de conclure sur le pigment.

Source : CICRP.

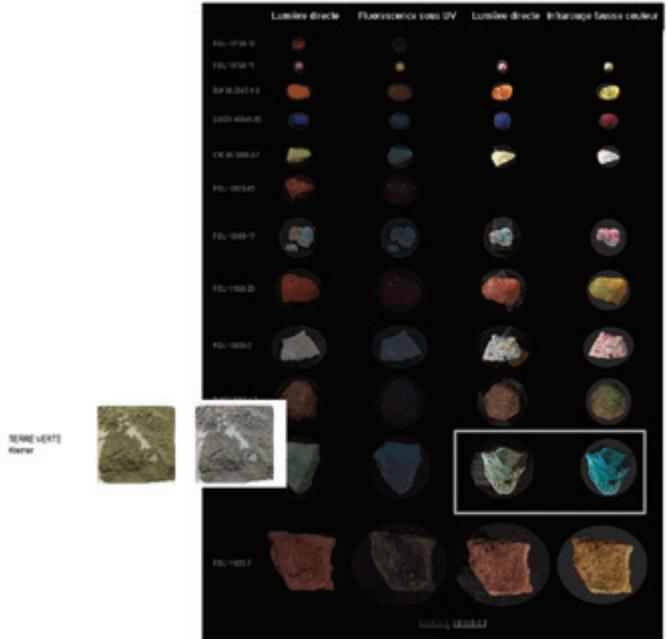
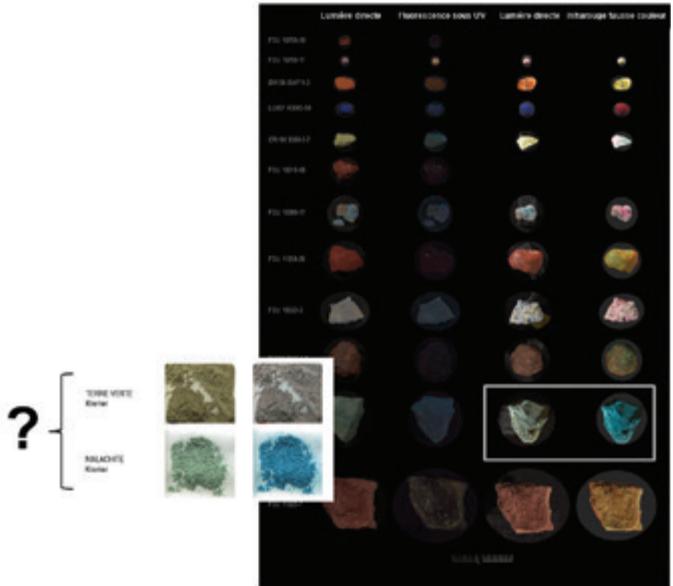


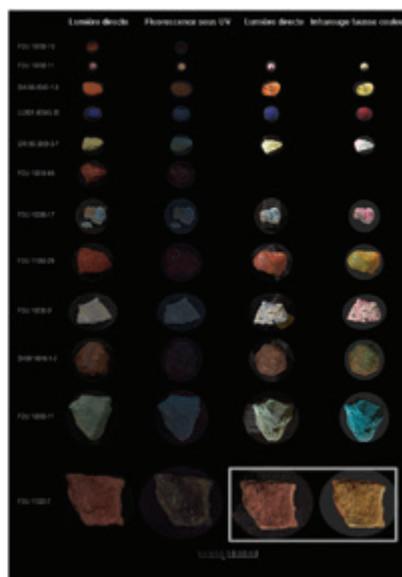
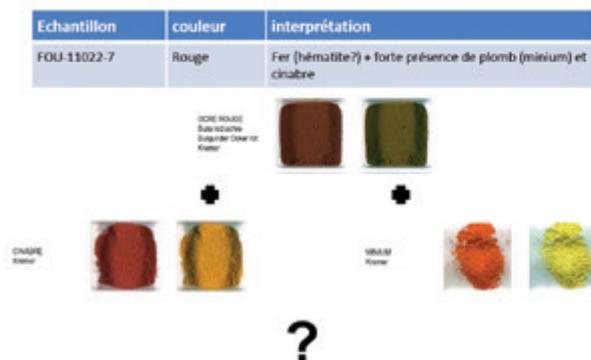
Figure 25

Les couleurs obtenues lors de l'étude par imagerie de l'échantillon de pigment vert du CEAlex (encadré blanc à droite) semblent correspondre à celles de la malachite du référentiel du CICRP, ce qui n'est pas confirmé par les analyses chimiques élémentaires.

Source : CICRP.



Echantillon	couleur	interprétation
FOU-10105-11	Vert	Terre verte



**Figure 26**

Les images du pigment du CEAlex (encadré blanc à droite) semblent indiquer que ce pigment est constitué d'un mélange de trois composants (ocre, minium, cinabre).

Source : CICRP.

– l'impossibilité de différencier les poussières en surface du matériau, dans l'analyse par spectroscopie de fluorescence X ;

– l'impossibilité de détecter les éléments légers pour cette dernière technique ou la difficulté de détecter certains autres éléments comme les halogènes, pour ce qui concerne le LIBS ;

– une mauvaise connaissance de l'épaisseur de la couche étudiée dans le cas de la micro-spectroscopie de fluorescence X ;

– l'interprétation des spectres en présence de matériaux organiques qui est difficile sur spectre LIBS et impossible sur un spectre obtenu par micro-spectroscopie de fluorescence X.

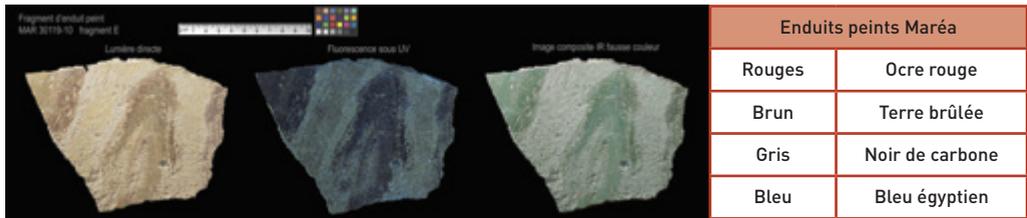
La combinaison des résultats d'analyse obtenus ne permet pas toujours de conclure de manière univoque. Dans le cas du pigment vert de la **Figure 24**, les analyses en microscopie

de fluorescence X permettent de conclure à la présence de terre verte. Mais l'analyse par imagerie multi-bande à partir du référentiel conduit à des résultats différents : on voit qu'en infrarouge fausse couleur par exemple, la terre verte donne une couleur grise, tandis que l'échantillon de pigment vert étudié donne une couleur bleue.

Cette observation conduit à penser que l'on est en présence de malachite<sup>12</sup> (**Figure 25**). De plus, il est difficile de vérifier cette interprétation par l'analyse par spectroscopie de fluorescence X car le cuivre est mal détecté.

De même dans le cas de l'échantillon rouge de la **Figure 26**, la comparaison des couleurs avec celles de l'ocre rouge de référence montre que la couleur marron obtenue en infrarouge fausse couleur pour l'échantillon

12. Malachite : carbonate de cuivre hydraté de couleur verte.



**Figure 27**

Les archéologues ont pu déterminer la nature des pigments des enduits peints.

Source : CICRP.

de référence n'est pas tout à fait identique à celle obtenue pour l'échantillon étudié. Les analyses élémentaires indiquent par ailleurs la présence de plomb (sans doute sous forme de minium) et de mercure (sans doute sous forme de cinabre). La différence de couleur entre le référentiel CICRP et l'échantillon de pigment du CEAlex résulte donc sans doute dans le fait que l'échantillon issu de fouille est constitué d'un mélange de ces trois composants.

En conclusion, s'il est important de combiner l'imagerie multi-bande avec les deux techniques d'analyses chimiques élémentaires, ce n'est pas toujours suffisant

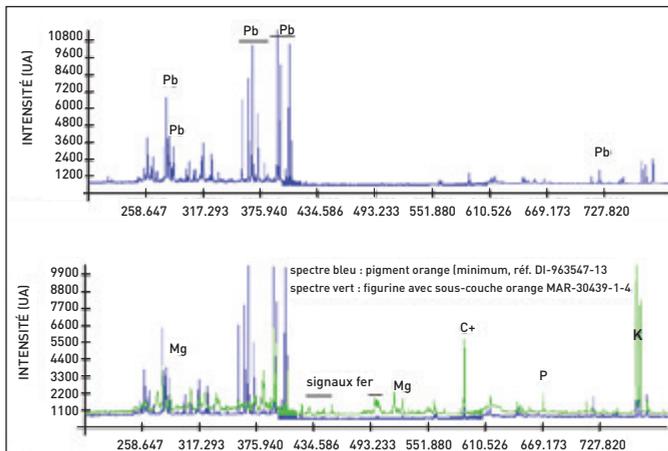
dans certains cas pour identifier avec certitude la composition des pigments.

### 2.3. Archéométrie des enduits peints

Les mêmes techniques appliquées à l'étude des enduits peints (**Figure 27**) ont montré que les rouges étaient des ocres rouges, que les bruns étaient de la terre brûlée du fait de la présence de manganèse, que dans le gris il y avait du noir de carbone, que dans certains noirs il y avait un peu de manganèse et que le bleu était essentiellement du bleu égyptien.

### 2.4. Archéométrie des statuettes

Il n'a pas été possible d'utiliser la micro-spectroscopie de fluorescence X pour l'analyse des statuettes, qui sont des objets en trois dimensions et de relief très irrégulier. La **Figure 28** présente les résultats d'une analyse LIBS. La partie supérieure qui sert de spectre de référence est celle d'un pigment orange à base de minium. Le spectre vert inférieur correspond à celui obtenu sur une statuette Bès<sup>13</sup> ; quand on le compare au spectre de référence, on voit que les signaux sont équivalents avec un signal

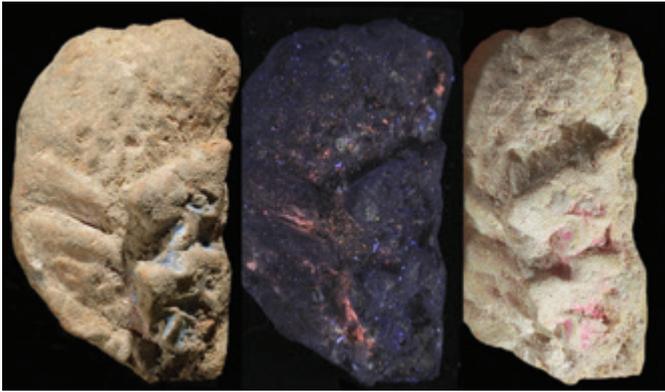


**Figure 28**

Comparé au spectre de référence (en bleu), le spectre des pigments de la statuette de Bès (en vert) révèle la présence majoritaire de plomb.

Source : CICRP.

13. Bès : dieu égyptien associé au foyer dans la mythologie égyptienne.



**Figure 29**

L'imagerie technique réalisée sur cette statuette révèle sa polychromie.  
Source : CICRP.

fort correspondant au plomb et des signaux qui correspondent à la présence d'autres éléments comme le calcium et un peu de fer. Notre interprétation est donc que nous avons sans doute du minium, soit mélangé avec un peu d'ocre rouge, soit formant une couche dissociée d'une couche d'ocre rouge.

L'imagerie multi-bande de la **Figure 29** permet de mettre en évidence des zones présentant des traces de polychromie<sup>14</sup> qui ne sont pas forcément bien visibles en lumière blanche.

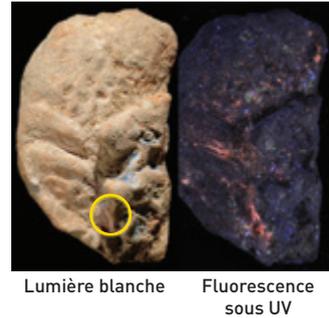
La fluorescence sous rayonnement UV (**Figure 30**) fait clairement apparaître des zones ponctuelles avec une couleur rose très nette. L'analyse LIBS sur ces zones a montré la présence de fer en quantité importante que nous interprétons comme due à un pigment, sans doute de l'hématite ou de l'ocre rouge.

De même l'imagerie infrarouge fausse couleur (**Figure 31**) nous

donne plus d'informations sur le bleu de l'image en lumière blanche. L'analyse élémentaire par LIBS de la zone de la flèche zone montre qu'il y a du cuivre, du silicium et du calcium. L'ensemble de ces résultats, par référence à nos analyses précédentes, permet de penser que nous sommes sans doute en présence de bleu égyptien.

Il est par ailleurs important, dans l'interprétation de l'imagerie, d'appliquer le même protocole d'acquisition des images, pour pouvoir réaliser une comparaison des couleurs des échantillons étudiés avec celles du référentiel utilisé.

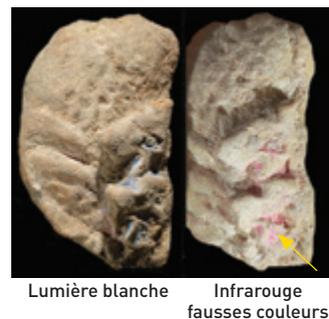
Par exemple, pour une autre statuette (**Figure 32**), nous avons comparé les couleurs obtenues par imagerie multi-bande avec celles du référentiel du C2RMF. Pour les échantillons de la partie inférieure, on voit qu'il y a une bonne correspondance avec les couleurs du bleu égyptien du référentiel du CR2MF [Kremer10060 ; **Figure 33**]. Mais c'est plus compliqué pour l'échantillon du haut,



Lumière blanche      Fluorescence sous UV

**Figure 30**

La couleur rose apparaissant sur cette tête par fluorescence sous UV, et difficilement visible sous lumière du jour, traduit la présence d'un pigment de type hématite ou d'ocre rouge, comme le confirme la grande quantité de fer détectée par analyse chimique élémentaire.



Lumière blanche      Infrarouge fausses couleurs

**Figure 31**

La couleur rose en imagerie fausse couleur de ce pigment bleu et la présence de certains éléments comme le cuivre et le silicium par analyse chimique élémentaire indiquent la présence de bleu égyptien.

14. Polychromie : procédé consistant à appliquer différentes couleurs par superposition.

Figure 32

Deux objets (en haut, les plumes de la coiffe d'une statuette de Bès, en bas, fragment de la représentation de piédestal) ayant des traces de pigment bleu et une réponse différente en infrarouge fausse couleur.

Source : CICRP.



notamment pour la réponse en infrarouge fausse couleur (Figure 33), qui ne correspond ni à celle du bleu égyptien ni à celle de l'azurite mais qui semble être proche de l'azurite<sup>15</sup> du référentiel CICRP.

En conclusion, ces études préliminaires ont permis, dans le contexte archéologique alexandrin, de mettre en place et d'évaluer des méthodes d'analyses non

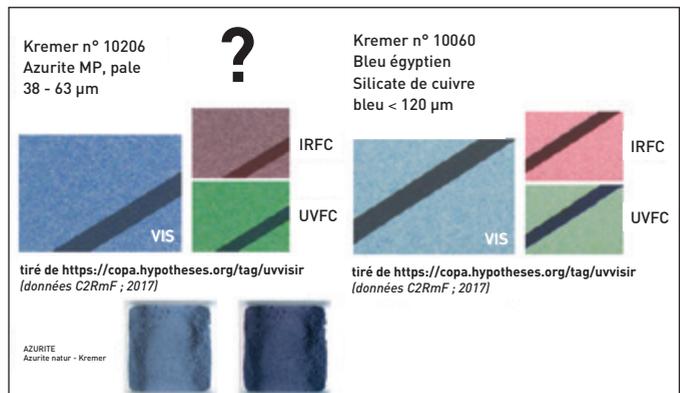
destructives, et de définir des protocoles à mettre en place. Cependant le bilan montre que les techniques d'analyse par imagerie technique et de chimie élémentaire sont certes nécessaires mais ne sont pas suffisantes dans beaucoup de cas. Des analyses complémentaires sont à mener à l'aide d'équipements analytiques complémentaires. Ces études ont ainsi permis de préciser quels étaient les premiers équipements analytiques nécessaires au futur laboratoire d'analyse du CEALex.

15. Azurite : carbonate hydraté de cuivre, minéral naturel de couleur bleue.

Figure 33

Référentiels du C2RMF et du CICRP pour l'azurite et pour le bleu égyptien.

Source : CICRP et C2RMF.



## L'évolution du laboratoire d'analyses des matériaux du CEALex

Dans ce cadre, en 2013, le laboratoire de caractérisation des matériaux a pris corps au sein du CEALex. Trois salles sont dévolues au travail du laboratoire : la première concerne exclusivement le traitement des échantillons (tami-sage, découpe, polissage, etc.), la deuxième est dédiée aux examens macro et microscopiques (stéréomicroscope, microscopes métallographiques, microscopes polarisants<sup>16</sup>), la troisième est dédiée à la chimie analytique avec l'équipement de micro-spectroscopie de fluorescence X, et depuis 2017 un microscope électronique à balayage (MEB-EDS) de paillasse, un équipement de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et un spectroscope Raman (**Figure 34**).

Le matériel qui équipe actuellement le CEALex est suffisant pour répondre à de nombreux besoins dans le domaine de l'archéologie, notamment pour développer l'étude des couleurs et de leur support (dossier comprenant les enduits peints, les terres cuites figurées de l'île Maréa et pigments bruts d'Alexandrie). Néanmoins, dans le cas de la caractérisation

16. Microscope polarisant : microscope optique muni de deux filtres utilisant les propriétés de la lumière.

**Figure 34**

*Le soutien financier de la Maison de la Chimie a permis au CEALex de s'équiper en matériel d'analyse de haute performance.*

Source : CEALex, CNRS.



de matériaux spécifiques comme la détermination de la nature d'argiles, ou encore la détermination de nature plus poussée de matériaux organiques comme des liants, il faudrait avoir accès à d'autres équipements comme, par exemple, la diffraction de rayons X (DRX) ou la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CPG-SM)<sup>17</sup>.

Il faut savoir qu'aujourd'hui les équipements de diffraction de rayons X se miniaturisent et deviennent accessibles et utilisables pour des laboratoires comme le CEAlex. En revanche, les équipements du type CPG-SM sont beaucoup trop onéreux, envahissants et fragiles pour un laboratoire d'archéologie comme le CEAlex. La solution serait de trouver un laboratoire égyptien permettant d'avoir accès à ce type d'équipement très spécifique.

La création du laboratoire de caractérisation des matériaux archéologiques a permis au CEAlex de gagner en autonomie, mais le besoin en termes de collaboration ne doit pas être négligé : non seulement pour l'accès aux équipements, mais aussi pour la réalisation de formations spécifiques sur des protocoles d'analyses adaptés au contexte alexandrin.

---

17. Chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse (CPG-SM, ou « GC-MS » en anglais) : technique de séparation puis d'analyse de composés organiques pouvant passer à l'état gazeux.