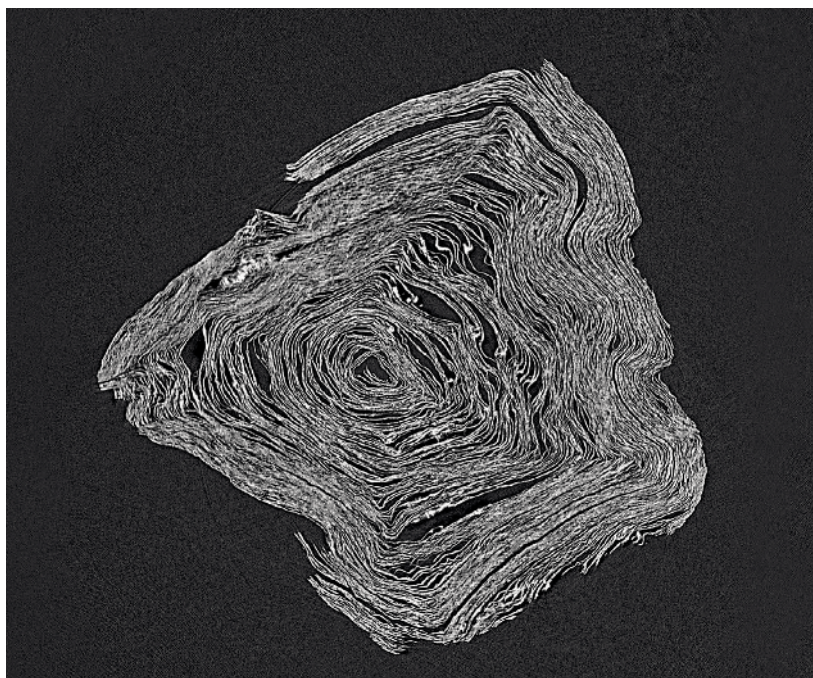




Souvent, les fragments produits par l'ouverture mécanique des rouleaux de papyrus d'Herculaneum, comme celui montré ci-dessus, sont constitués de plusieurs couches collées, dont chacune porte une fraction de texte. Ci-dessus à droite : la radiographie en coupe du papyrus d'Herculaneum de Paris n° 4.



vite considérée comme une percée. Fondée sur les rayons X, elle vise à mesurer les minces reliefs créés par l'encre sur le papyrus. En l'adoptant, les chercheurs espèrent contourner le problème dont souffraient toutes les tentatives de lecture par les rayons X : l'omniprésence du carbone dans la masse des rouleaux.

En effet, les auteurs anciens utilisaient une encre essentiellement composée d'un liant et de carbone (suie ou charbon de bois). Même avec les meilleurs appareils à rayons X, les chercheurs ne sont pas parvenus jusqu'à présent à distinguer le carbone de l'encre de celui du papyrus carbonisé. Toutefois, ils ne se sont concentrés que sur le « contraste d'absorption », le principe exploité en radiographie médicale et dans les scanners à rayons X : l'absorption plus ou moins importante des rayons X selon la densité du matériau traversé. Daniel Delattre et Vito Mocella se sont demandé si l'on pouvait distinguer le petit monticule d'encre séchée en exploitant le contraste de phase, c'est-à-dire en détectant les déphasages (la phase d'une onde caractérise à quel stade se trouve le cycle suivi par son amplitude) entre les rayons X qui traversent des milieux différents en nature ou en épaisseur.

L'avantage décisif de la tomographie X par contraste de phase est la possibilité de produire des images même quand le contraste d'absorption est très faible. L'inconvénient est que pour produire le rayonnement X nécessaire, il faut une énorme machine : un accélérateur de particules. Afin de pouvoir déterminer précisément les déphasages, il faut en outre disposer d'une source X de qualité laser, en d'autres termes une source de lumière X monochromatique (un rayonnement X de longueur d'onde unique).

Les synchrotrons, où des électrons décrivent à grande vitesse une trajectoire circulaire et émettent de ce fait un rayonnement dans la direction tangente, fournissent de telles sources de rayons X. Les chercheurs s'en sont servi pour balayer ligne par ligne l'un des rouleaux d'Herculaneum. Le procédé a permis d'obtenir des images de l'intérieur froissé du rouleau. La structure la plus évidente qui est alors apparue est l'entrecroisement des fibres végétales constituant le papyrus. Au cours de la fabrication de ce papier de l'Antiquité, la moelle des tiges du papyrus (*Cyperus papyrus*) était en effet coupée en bandes, qui étaient ensuite entrecroisées et pressées. Dans leur article de 2015, Daniel Delattre et Vito Mocella affirment avoir reconnu une série de lettres : des structures isolées très floues. S'agit-il vraiment de lettres ou les chercheurs n'ont-ils eu que l'illusion de trouver ce qu'ils attendaient ? Depuis la publication de ces travaux, la question est vivement débattue au sein de la petite communauté des papyrologues.

## LE PLOMB REND L'ENCRE VISIBLE

En 2016, Daniel Delattre et Vito Mocella participèrent à un nouveau projet promettant d'améliorer sensiblement la tomographie par contraste de phase appliquée aux papyrus : utiliser la spectrométrie de fluorescence aux rayons X. La fluorescence X est le fait que certains atomes, excités par les rayons X, émettent ensuite un rayonnement de fréquence caractéristique. Par spectrométrie de fluorescence aux rayons X, les chercheurs ont pu démontrer, à l'aide des rayons X fournis par le synchrotron européen ESRF (European Synchrotron Research Facility), à Grenoble, >

> que l'encre de deux minuscules fragments de papyrus conservés à l'Institut de France, à Paris, contient du plomb.

On ignore la raison de cette présence de plomb, mais selon les chercheurs, tout indique qu'elle n'est pas accidentelle. On peut donc s'attendre à ce que l'encre des papyrus d'Herculanum contienne du plomb, ce qui pourrait grandement aider à lire les rouleaux. En effet, au-delà d'un certain seuil de concentration, le plomb est une très bonne source de contrastes (en densité, en déphasage...) aux rayons X. Quand le faisceau X d'un synchrotron est réglé sur la longueur d'onde que le métal lourd absorbe le mieux, il devient possible d'obtenir une image de sa distribution spatiale et donc de celle de l'encre. Mais pour l'heure, nul ne sait si l'encre des trois cents rouleaux encore scellés contient du plomb et, le cas échéant, à quelles concentrations.

Au cours de l'été 2019, les principaux experts en papyrus se sont réunis en conférence à Lecce, en Italie, afin de discuter de ces avancées. Vito Mocella en a profité pour présenter à ses collègues une autre nouvelle méthode d'imagerie. Cette variante suppose aussi une certaine teneur en plomb de l'encre et exploite aussi le rayonnement synchrotron. On

utiliserait deux têtes de mesure indépendantes afin de produire des images stéréoscopiques (de la même façon que deux yeux permettent de percevoir le relief) de la fluorescence du plomb lorsque le faisceau de rayons X sonde un point donné à l'intérieur d'un rouleau.

## FLUORESCENCE X, INTELLIGENCE ARTIFICIELLE...

La fluorescence X de la plupart des éléments est un rayonnement de basse fréquence, qui ne peut s'échapper de l'intérieur d'un rouleau de papyrus, mais ce n'est pas le cas avec des noyaux atomiques lourds tels que le plomb. Soumis aux rayons X énergétiques du synchrotron, les noyaux de plomb émettent un rayonnement qui atteint les têtes de mesure sans être absorbé. La présence de plomb dans l'encre est donc une chance, qui pourrait rendre possible l'emploi de la «tomographie confocale par fluorescence».

La mise en évidence de plomb au sein d'autres fragments de papyrus d'Herculanum annoncée par une équipe de l'Institut fédéral de recherche et d'essai des matériaux, à Berlin, autour d'Olivier Bonnerot et Ira Rabin, est donc une découverte bienvenue. Les concentrations mesurées varient considérablement, mais la présence de plomb dans l'encre d'Herculanum semble désormais plus certaine.

Pour autant, toute utilisation du rayonnement synchrotron est limitée par le fait que le temps de faisceau est très coûteux, tandis que la recherche des financements nécessaires et le dépôt des candidatures occupent les chercheurs pendant des mois, voire des années, avant qu'ils puissent effectuer leurs expériences. La situation est encore compliquée par le fait que les synchrotrons sont de gros équipements auprès desquels il faut amener les papyrus, ce qui oblige à emprunter ces derniers aux institutions qui les protègent jalousement.

Hormis le bureau des Papyrus, qui détient de loin le plus grand nombre de rouleaux et de fragments, quatre rouleaux se trouvent à l'Institut de France, à Paris, et, semble-t-il (étant donné qu'ils sont sous la forme de fragments), huit à la Bodleian Library d'Oxford. Dans l'ensemble, cependant, obtenir des conservateurs qu'ils remettent les originaux aux instituts de recherche étrangers est un obstacle difficile à franchir pour les chercheurs intéressés. Le contrôle des conservateurs sur leurs rouleaux donne de l'importance aux institutions auxquelles ils appartiennent, ce qui explique que seule une poignée d'études tomographiques à rayons X aient pu être tentées.

Brent Seales, chercheur de l'université du Kentucky, qui a travaillé avec Vito Mocella et Daniel Delattre lors des premières expériences faisant appel au rayonnement synchrotron, mais qui suit aujourd'hui sa

Cette statue d'Hermès trouvée dans la villa des Papyrus en 1758 illustre l'idée épicurienne selon laquelle les dieux ne s'occupent pas des humains : le messager des dieux qu'est Hermès est assis et semble n'avoir rien à faire.

