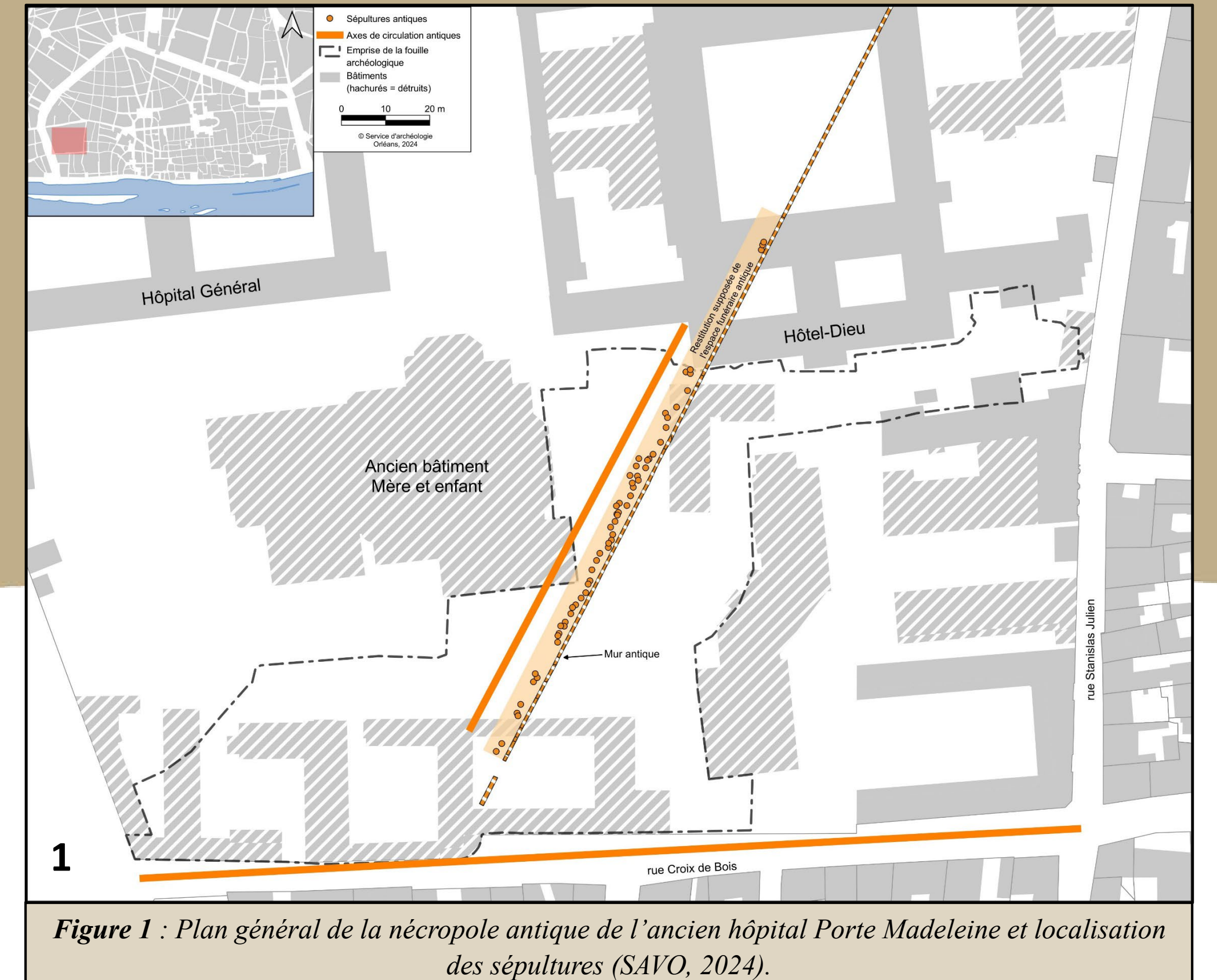


L'utilisation de l'imagerie dans l'étude d'une nécropole antique d'Orléans : photogrammétrie, RTI et tomographie à rayons X.

Matthieu LÉUILLET (Service d'Archéologie de la Ville d'Orléans, UMR 5199 PACEA)
Julien COURTOIS (Service d'Archéologie de la Ville d'Orléans, UMR 7324 CITERES-LAT, UMR 7041 ArScAn-GAMMA)
Caroline MILLEREUX (Service d'Archéologie de la Ville d'Orléans, UMR 8546 AOROC, ENS/CNRS)

Les deux fouilles archéologiques de l'ancien Hôpital Porte Madeleine d'Orléans menées par le Service d'Archéologie de la Ville entre 2022 et 2025 ont permis de mettre au jour 76 sépultures antiques appartenant à une nécropole atypique utilisée entre la fin du Ier s. de notre ère et le milieu du IIIe s. Située à l'écart du centre urbain antique, entre deux voies sortantes, cet espace funéraire se caractérise par une organisation spatiale étirée sur une bande de 5 m de largeur et au moins 130 m de long (Fig. 1). Toutes les sépultures sont des inhumations en cercueil, ce qui dénote des nécropoles de cette période en Gaule, ou incinérations et inhumations se côtoient régulièrement. Le recrutement est ici très particulier, avec uniquement des individus masculins adultes. Enfin, le mobilier est assez abondant, notamment des monnaies, des cruches ou encore un corpus exceptionnel de 22 tablettes de défexion.

L'étude de ces fines plaques de plomb, pliées ou enroulées sur elles-mêmes, nécessite l'utilisation de techniques d'imagerie particulières. En effet, les tablettes peuvent être inscrites au moyen de très fines incisions dans le métal, difficilement visibles à l'œil nu. Enfin, malgré l'intervention d'une restauratrice qui réalise le traitement et la stabilisation de ces objets, leur état de fragilité peut compliquer l'ouverture ou par la suite la lecture du texte inscrit. Il est donc nécessaire de trouver un moyen d'accéder au texte sans même avoir à dérouler la tablette.



Photogrammétrie des sépultures

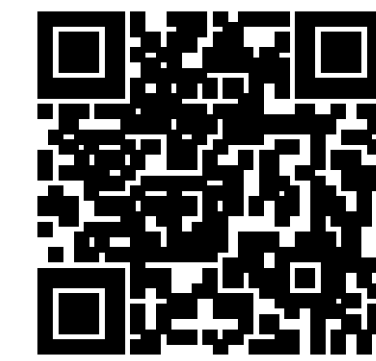
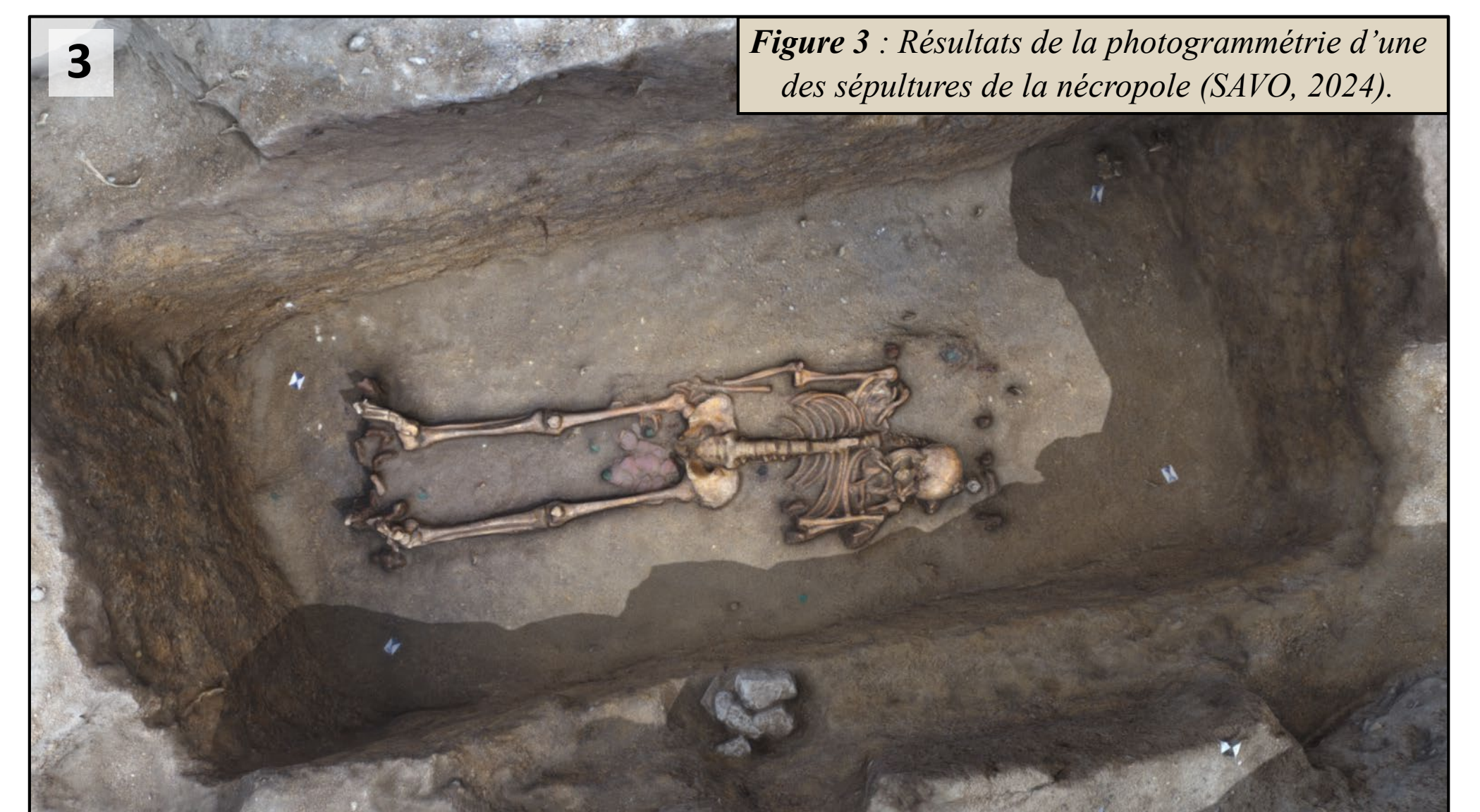
La photogrammétrie est une méthode de relevé permettant de reconstituer un modèle en trois dimensions de l'objet étudié à partir de photographies numériques, sur le principe originel de la stéréoscopie. Sur le site de l'ancien hôpital Porte Madeleine à Orléans, les sépultures de la nécropole antique (I-III^e s. ap. J.-C.), des structures généralement assez complexes, ont presque toutes été relevées en photogrammétrie. Ce sont ainsi 64 de ces sépultures qui possèdent un jumeau numérique.

L'intégration de ces modèles dans des systèmes géoréférencés offre la possibilité d'effectuer des mesures précises de distance et de volume, ce qui en fait un outil alliant la richesse et la neutralité des photographies à la justesse d'un relevé graphique. Par ailleurs, le gain de temps sur le terrain n'est pas négligeable.

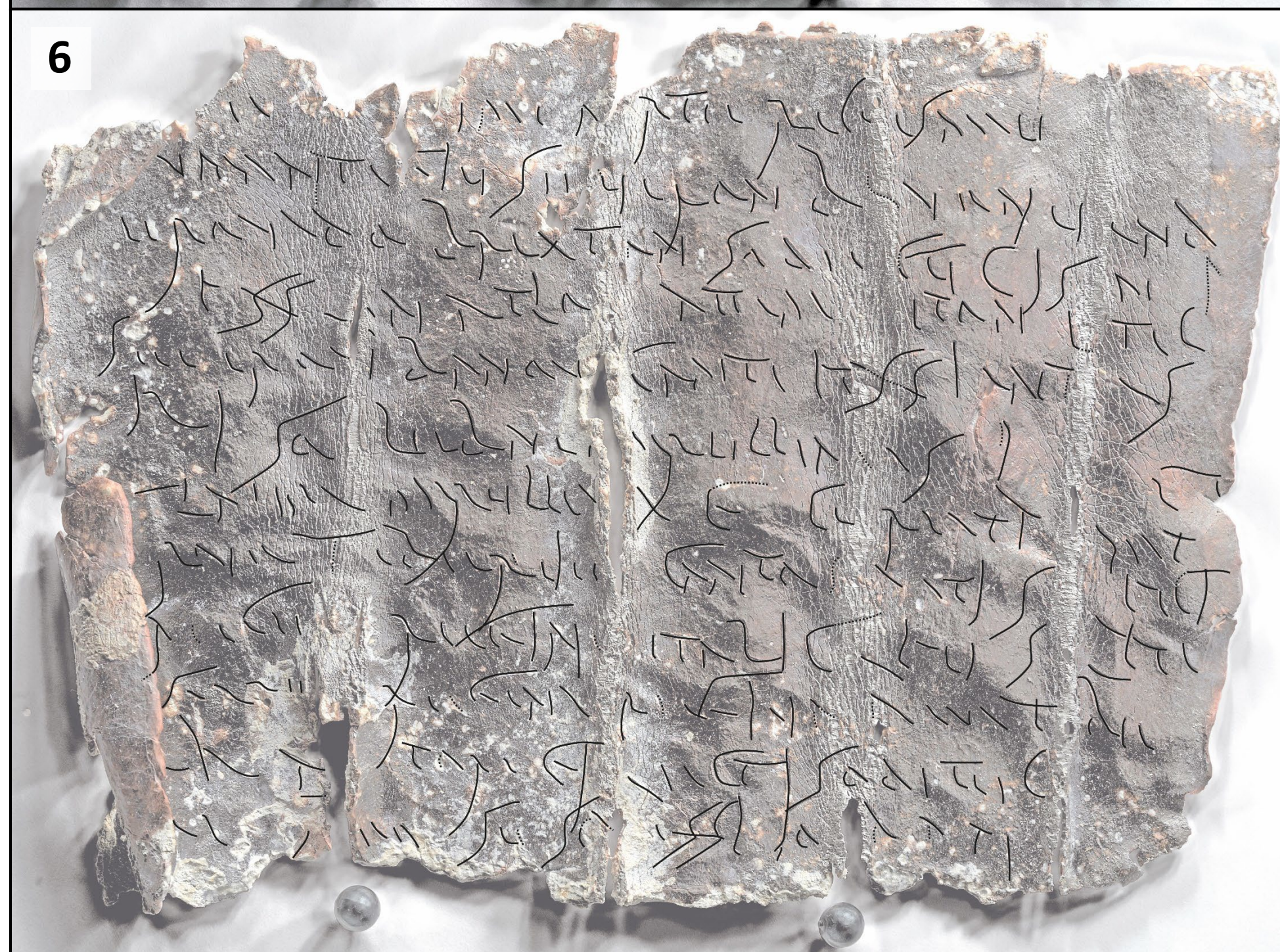
Pour la plupart de ces sépultures, ce sont 100 à 200 photos qui sont prises au moyen d'un appareil photo de type reflex, en réalisant une série de vues obliques et zénithales (Fig. 2). Celles-ci sont ensuite traitées au sein du logiciel Agisoft Metashape. L'utilisation des cibles de référence de Metashape, automatiquement reconnues par le logiciel, facilite le traitement et le géoréférencement du modèle.

Une fois le traitement photogramétrique achevé, un fichier .OBJ est créé (vectoriel 3D avec texture, Fig. 3), ainsi qu'un export de l'orthophotographie au format geotiff pour être inséré dans le SIG de l'opération. L'import de ce modèle 3D sur la plateforme Sketchfab permet une diffusion à destination du grand public (Cf. QR code).

Pour l'archéo-anthropologie, cette méthode permet d'enregistrer de façon pérenne la réalité de la sépulture. Elle conserve les indices taphonomiques et la position du squelette et des différents dépôts au sein de la tombe. Elle permet aussi de projeter d'autres éléments préalablement topographiés et d'avoir une réflexion intégrant la verticalité et les volumes notamment pour l'architecture funéraire.



Scannez ce QR code pour accéder à la page sketchfab du Service d'archéologie d'Orléans



Figures 5 et 6 : Vues de la tablette de défexion de la sépulture F2199 issues de la RTI : en haut, RTI brute ; en bas, avec relevé du texte (Antoine Cazin, La Fabrique de patrimoines en Normandie, 2023 ; SAVO, 2024).

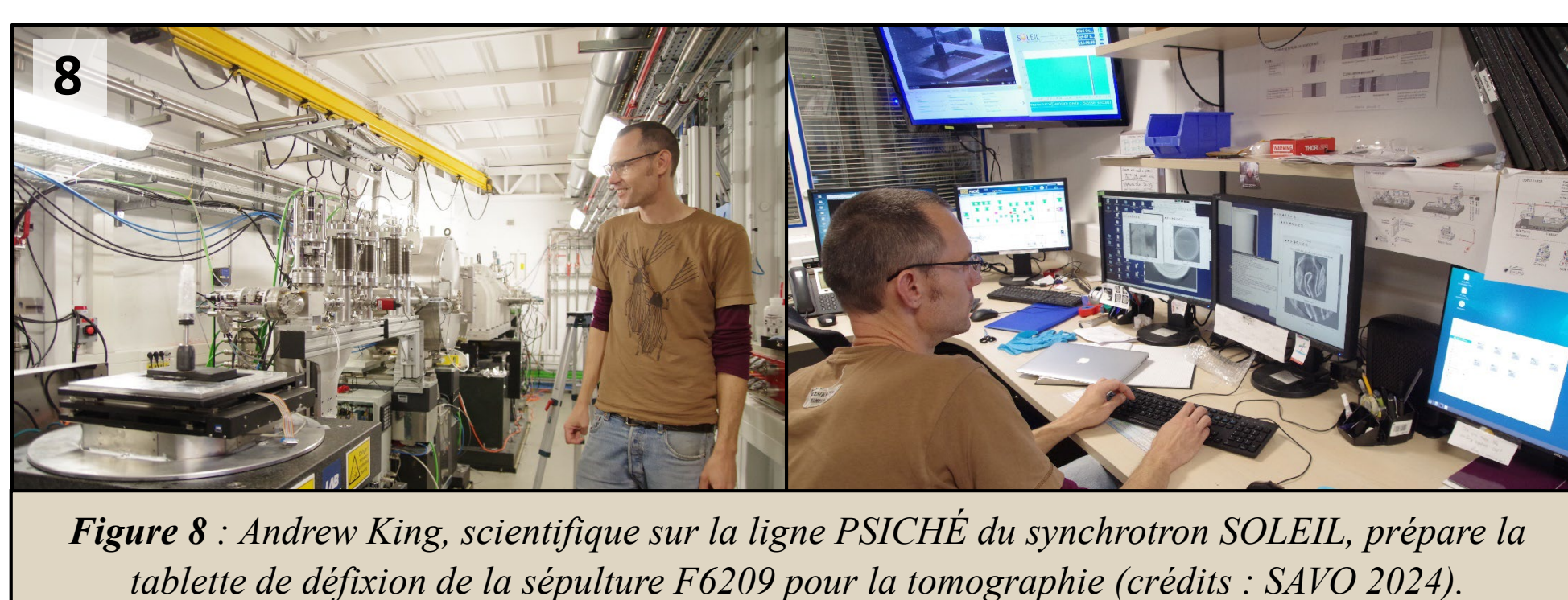


Figure 9 : Détail de la tablette provenant de la sépulture F6209 avant la tomographie (crédits : SAVO 2024).



À suivre

Coupler et croiser ces différentes données, en lien avec la restauratrice, pour guider les choix de restauration.

Procéder à une sélection pour chaque type d'intervention : est-ce nécessaire/possible de tout faire dans le cadre du rapport de fouille ?

=> question du financement et du temps d'étude.

RTI

La *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) est une méthode photographique permettant de produire une image dynamique à partir d'une série de clichés pris avec des angles de lumières multiples. Cela permet notamment de modifier dynamiquement la source lumineuse éclairant l'objet étudié, pour mettre en évidence des micro-reliefs.

Les incisions entaillant les tablettes de plomb étant très fines et peu profondes, difficilement lisibles à l'œil nu (Fig. 4), le choix s'est porté vers la technique de la RTI pour révéler ces inscriptions et tenter une transcription. Le paramétrage de l'éclairage en lumière rasante, d'un côté ou de l'autre de la tablette en fonction de l'orientation des incisions permet ainsi de révéler le texte.

Les 5 tablettes de défexion trouvées lors de la première fouille en 2022 ont été confiées à Antoine Cazin, du laboratoire « La Fabrique de Patrimoines en Normandie », qui a réalisé les prises de vue et les traitements logiciels (Fig. 5). Les données de la RTI sont accessibles via le logiciel libre RTI Viewer, mais le prestataire a aussi mis en place une version allégée accessible en web.

Cette technique de la RTI a permis de révéler le texte de la manière la plus complète et dynamique possible, facilitant grandement par la suite le travail des linguistes. Si la méthode est parfaite pour ce type de problématique, on notera cependant que la partie logicielle reste encore à améliorer. En effet, le logiciel RTI Viewer permet une exploration complète du relevé et la réalisation de captures d'écran, mais un module additionnel de dessin ou de calque vectoriel permettrait de faciliter la transcription des inscriptions. Il a fallu ici procéder à des exports selon divers angles de lumière, importer ces captures d'écran dans un logiciel de dessin vectoriel et redessiner par-dessus (Fig. 6). Cette étape engendre la perte du bénéfice de l'outil dynamique de modification de la source lumineuse, qui permet souvent de comparer les points de vue pour privilégier des hypothèses de rendu.



Figure 4 : Vue de la tablette de défexion de la sépulture F2199 sans RTI (SAVO, 2023).

Tomographie à rayons X

Un tomographe à rayons X permet de scanner l'intérieur d'objets (comme un scanner médical) mais avec des niveaux de puissance plus élevés, au moyen de particules beaucoup plus énergétiques (Fig. 7). Cela permet ainsi de passer au travers de feuilles de plomb et de scanner en 3D l'intérieur d'une tablette de défexion (Fig. 9) sans avoir à la dérouler.

Pour atteindre de hauts niveaux de puissance, il est nécessaire d'utiliser des particules très énergétiques. Pour les obtenir, il faut accélérer les électrons émis à une très grande vitesse, proche de celle de la lumière.

Le synchrotron SOLEIL comporte 29 lignes de lumières indépendantes (Fig. 7), qui constituent autant de laboratoires distincts travaillant sur des longueurs d'onde différentes, des infrarouges jusqu'aux rayons X durs. La ligne PSICHÉ, permet de travailler avec des particules de très haute énergie et de réaliser des tomographies à rayons X (Fig. 8).

Des premières mesures test ont pu y être réalisées en octobre 2024 et ont permis d'observer une coupe interne d'une des tablettes de défexion, révélant ainsi la manière dont celle-ci avait été pliée et enroulée (Fig. 10). Plusieurs parties internes de la feuille de plomb ont

été observées en plan, confirmant la présence d'incisions correspondant à des lettres, sur les deux faces de la tablette (Fig. 11). Il s'agit de la première tablette observée sur le site inscrite sur les deux faces.

L'équipe du Service d'Archéologie vient de déposer une demande de projet auprès du synchrotron SOLEIL pour procéder à un relevé tomographique de plusieurs tablettes de défexion, dans l'espoir d'obtenir leur déroulement virtuel et la découverte de nouveaux textes.

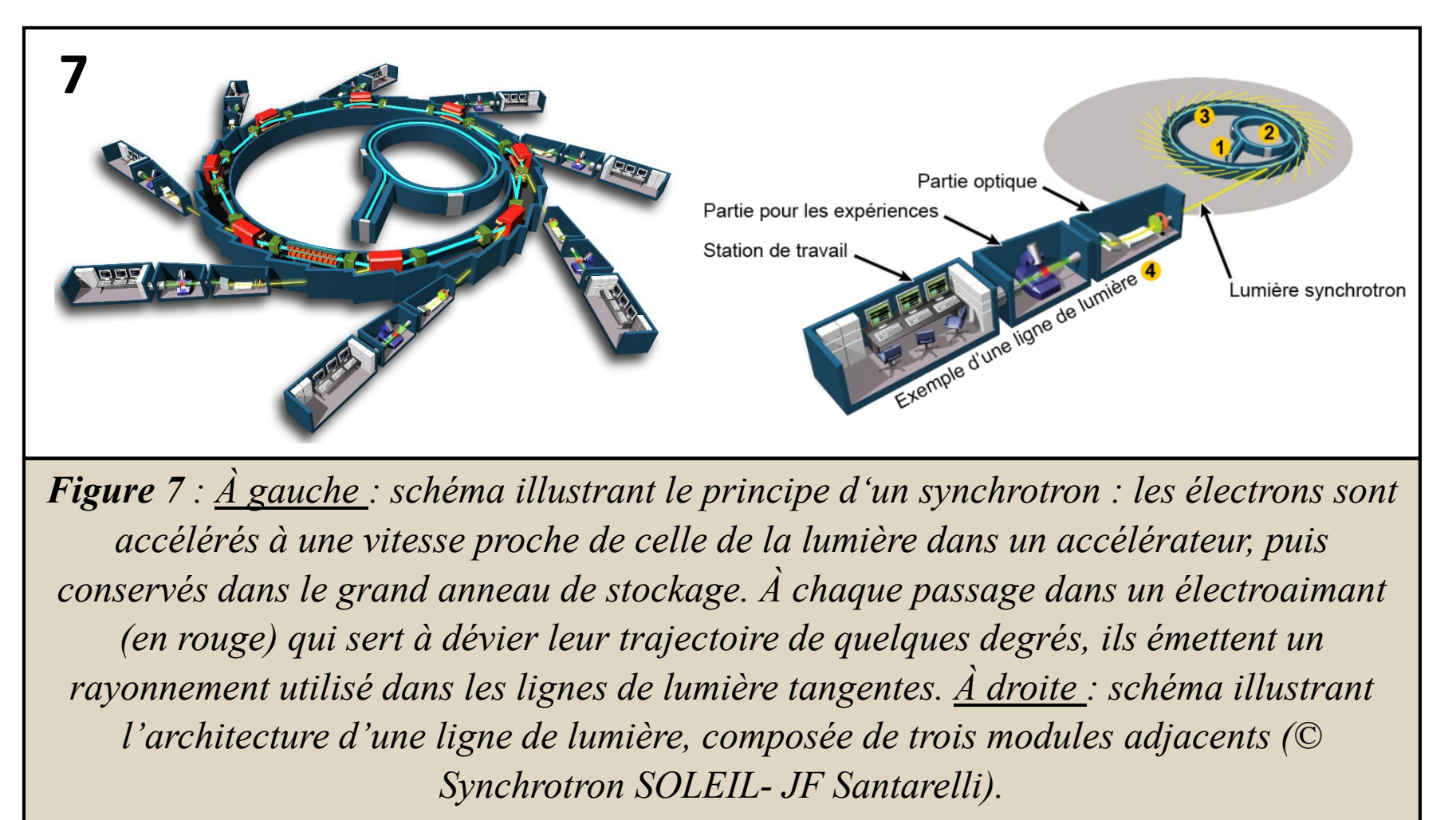


Figure 7 : À gauche : schéma illustrant le principe d'un synchrotron : les électrons sont accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière dans un accélérateur, puis conservés dans le grand anneau de stockage. À chaque passage dans un électroaimant (en rouge) qui sert à dévier leur trajectoire de quelques degrés, ils émettent un rayonnement utilisé dans les lignes de lumière tangentes. À droite : schéma illustrant l'architecture d'une ligne de lumière, composée de trois modules adjacents (© Synchrotron SOLEIL- JF Santarelli).

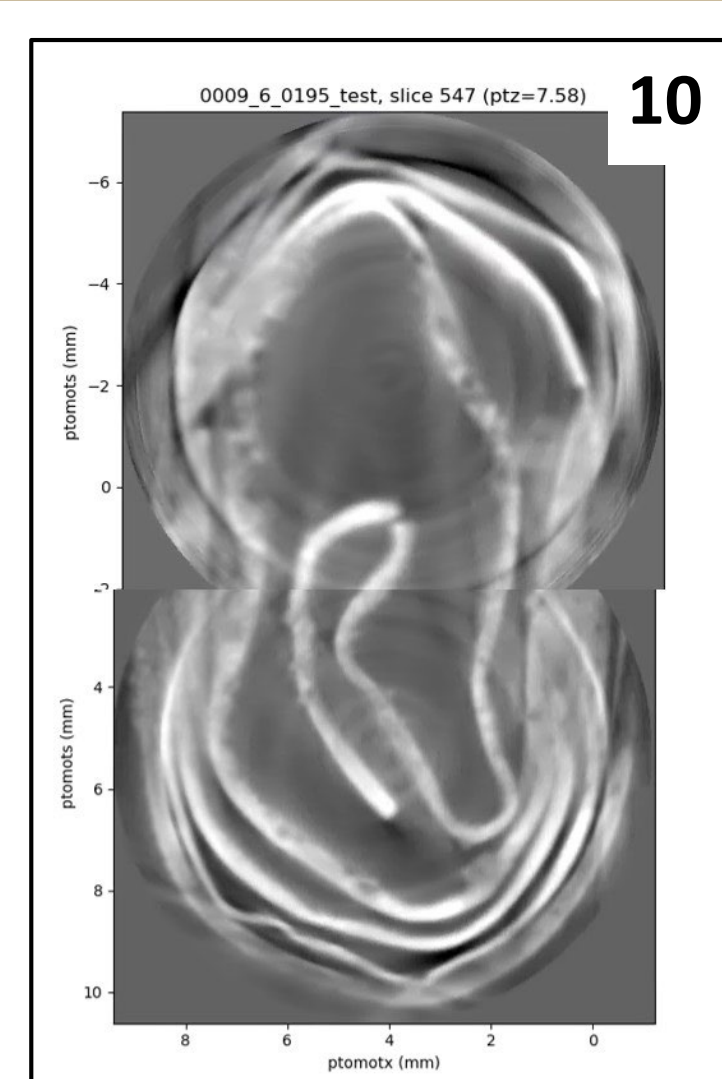
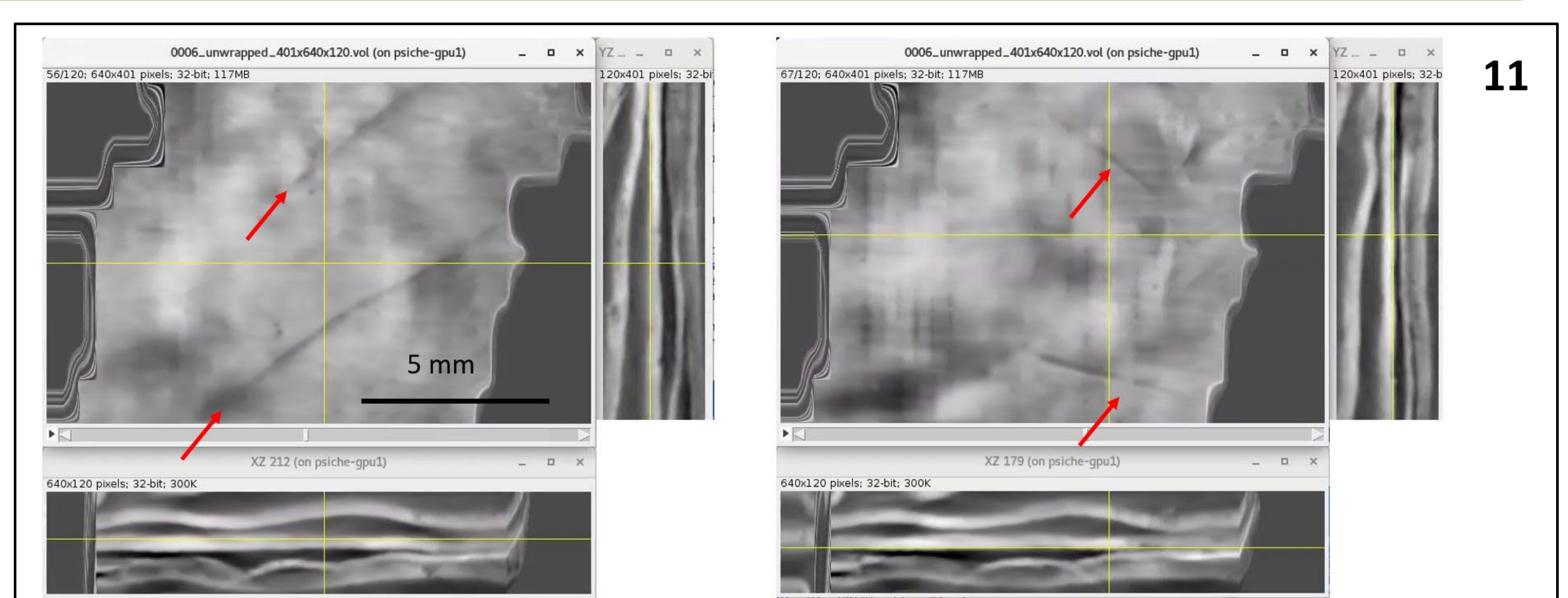


Figure 10 : Assemblage de deux sections de la tablette provenant de la sépulture F6209, ce qui permet de voir de quelle manière la tablette a été pliée (© Synchrotron SOLEIL).



SOLEIL SYNCHROTRON



psiché