

Analyse de la topographie des pièces de monnaie du San Pedro de Alcantara

R. VARGIOLU*
H. ZAHOUANI*
J.-Y. BLOT**

R É S U M É

La caractérisation des micro-reliefs de pièces de monnaie trouvées sur le site du naufrage du vaisseau de guerre espagnol *San Pedro de Alcantara* (1786) à son arrivée du Pérou hispano-colonial est placée dans le contexte méthodologique de l'analyse spatiale d'un site sous-marin de grande dispersion. L'analyse tribologique (étude quantitative du micro-relief) d'un lot de dix pièces d'argent a dégagé une grille classificatoire (corrosion piquage/corrosion érosion/stries d'abrasion, surface en plateaux). Inspirée des travaux de I. MacLeod sur des sites sous-marins côtiers, une relation entre la profondeur d'eau et deux paramètres de rugosité (SPvm — profondeur de la vallée moyenne de la rugosité — et SPTm (altitude moyenne pics vallées) a été observée sur deux lots, respectivement de trois et quatre pièces, classés selon le type de micro-relief. L'analyse tribologique d'une pièce d'or trouvée sur le site du naufrage à proximité de la zone dite «d'impact» a porté sur les zones d'actions mécaniques observables sur le micro-relief de la pièce. Les propriétés multi-échelles de l'analyse tribologique conduisent à souligner le potentiel de l'étude quantitative de la rugosité appliquée à la topographie du site sous-marin lui-même et à son croisement avec l'analyse de dispersion des artefacts.

R E S U M O

A caracterização dos microrrelevos das moedas encontradas no sítio do naufrágio do navio de guerra espanhol *San Pedro de Alcantara* (1786) à sua chegada do Peru hispano-colonial é colocada no contexto metodológico da análise espacial de um sítio submarino de grande dispersão. A análise tribológica (estudo quantitativo do microrrelevo) de um lote de dez moedas de prata permitiu elaborar uma grelha de classificação (corrosão por piquetado (*piquage*)/corrosão erosão/estrias de abrasão/superfície em planaltos). Inspirada nos trabalhos de I. McLeod em sítios submarinos costeiros, uma relação entre a profundidade da água e dois parâmetros de rugosidade (SPvm — profundidade do vale médio da rugosidade — e SPTm — altitude média dos picos e vales) foi observada em dois lotes, respectivamente com três e quatro moedas, classificados a partir do tipo de microrrelevo. A análise tribológica de uma moeda de ouro encontrada no sítio do naufrágio na vizinhança da zona

dita «de impacto» incidiu nas zonas de acções mecânicas observáveis no microrrelevo da peça. As propriedades multi-escalas da análise tribológica levam a sublinhar o potencial do estudo quantitativo da rugosidade aplicado à topografia do próprio sítio submarino e ao seu cruzamento com a análise de dispersão dos artefactos.

1. Introduction

L'analyse de la topographie des pièces de monnaie du *San Pedro de Alcantara* constitue un aspect de l'exploration méthodologique des sites archéologiques sous-marins dont la distribution spatiale est marquée par une forte composante dynamique.

Situé sur la côte de Peniche, au Portugal, le site sous-marin du *San Pedro de Alcantara* (1786) témoigne d'un accident maritime de grande dispersion dont la lecture «archéographique», d'une opacité radicale au premier abord, s'articule par ailleurs sur un réseau documentaire très dense, constitué de milliers de pages de texte manuscrites, d'une iconographie d'ordre monographique (toiles de maître et gravures) et de quelques cartes également manuscrites, immédiatement postérieures à l'accident.

Ce tissu documentaire fournit une toile de fond qui éclaire plusieurs aspects essentiels de la chronologie de la dispersion du site archéologique. Ce même tissu documentaire permet d'explorer la distribution in situ en dépit du bruit associé à la dispersion sous-marine initiale, à la fragmentation ou à la dispersion secondaire des vestiges due à la houle océanique et au ressac ainsi qu'aux intenses sauvetages réalisés sur le site au cours des mois et années suivant l'accident.

Le réseau documentaire textuel et cartographique met ainsi en relief la façon dont toute la partie centrale de la coque du vaisseau fut cisailée sous le choc contre le fond rocheux, amenant l'immobilisation brutale de la cargaison métallique. Le témoignage de certains survivants membres de l'état-major de bord précise qu'au moment du choc le bâtiment naviguait par vent portant à la vitesse de six nœuds.

Loin de constituer un simple particularisme à la limite de la plage chronologique couverte par la méthode archéologique, la présence de cette masse documentaire et son croisement avec l'interprétation archéographique glanée à partir de l'observation des vestiges sur le terrain apparaissent comme l'expression de ce que nous appellerons un «gradient épistémologique». Ce gradient intègre à un extrême les sites archéologiques où le chercheur ne dispose d'aucun support de l'écrit, dont ceux de la préhistoire, et à l'autre bout, les sites les plus récents relevant, eux, des approches regroupées sous le nom d'archéologie industrielle et bénéficiant de documentation textuelle et graphique de tous ordres qui inclut, le cas échéant, la photographie.

Situé juste en amont de cette ultime étape chronologique et méthodologique, le corpus documentaire hispano-péruvien associé au dernier voyage du *San Pedro de Alcantara* a permis de mettre en évidence la présence potentielle, tangible sur le site sous-marin portugais depuis les fouilles de 1988, de matériaux archéologiques provenant du Pérou préhispanique. Ces matériaux étaient transportés au titre de collections scientifiques dans le cadre de la mission royale au Pérou et au Chili (1778-1788) des botanistes espagnols H. Ruiz et J. Pavón.

Ces matériaux du Pérou préhispanique évoqués dans la documentation manuscrite d'époque comme des «antiquités des indigènes» soulèvent plusieurs questions sur le plan archéologique.

Celle que nous relèverons dans le cadre du présent article tient à la position de ces collections scientifiques à bord du vaisseau, et donc sur le site sous-marin, sachant que ces collections échappèrent aux sauvetages intenses des années 1786-89 bien qu'elles fissent partie de la cargaison officielle embarquée à Callao, le port de Lima, capitale du vice royaume du Pérou. Cette absence flagrante mise en évidence par l'articulation avec la documentation manuscrite a permis de recentrer la problématique archéologique sur l'analyse de la dispersion des vestiges.

Le recours à la tribologie (Georges et al., 2004) au sein de l'expérience décrite dans les pages qui suivent relève quant à lui d'une exploration méthodologique centrée sur l'observation de pièces de monnaie traitées dans ce cas comme des marqueurs spatiaux privilégiés du territoire sous-marin associé au naufrage de 1786.

1.1. Sites homogènes et sites de grande dispersion

Longtemps considéré comme le paradigme du site archéologique sous-marin, le site de naufrage a souvent été réduit sur le plan épistémologique à la métaphore de la «capsule de temps» pour décrire l'homogénéité chronologique d'une population d'objets dont la carrière fut figée dans le moment terminal de l'accident.

Au-delà de cette isochronie commune aux sites de catastrophe, un clivage a longtemps prévalu au sein de cette famille particulière de sites archéologiques.

L'archéologie du naufrage tend à privilégier au départ les sites ou parties de sites homogènes, pour des raisons heuristiques qui tiennent à la cohérence immédiate de l'interprétation dimensionnelle et spatiale donc de la reconstitution des liens fonctionnels entre les composants retrouvés sur le site archéologique.

Les naufrages en eau calme ou profonde, marqués par la submersion de la coque en l'absence de choc contre un obstacle, constituent le paradigme de ces sites de *type 1* qui incluent souvent les vestiges de la propre structure du navire conservés sous les sédiments.

Une toute autre situation prévaut sur un récif-barrière, en eaux agitées et sur des sites côtiers à faible profondeur, soumis à l'influence de la houle océanique ou de courants marins. L'archéologue britannique K. Muckelroy a mené des recherches pionnières dans les années 1970 sur ces sites côtiers marqués par une grande dispersion associée à une intense fragmentation des composants du navire lui-même. Muckelroy a prouvé qu'une analyse spatiale de ces sites de *type 2* était malgré tout possible en recourant à des outils d'analyse spatiale spécifiques (Muckelroy, 1975, 1978; Martin, 1998, p. 115). En l'absence de vestiges cohérents appartenant à la structure du navire, les recherches sur ces sites du second type ne disposent en effet que d'une nébuleuse éparse et souvent discontinuée d'objets ou de fragments.

L'apport majeur de Muckelroy en ce domaine, reflet des préoccupations méthodologiques de l'archéologie des années 1970, fut de se concentrer sur les relations spatiales des groupes d'objets au sein du territoire sous-marin correspondant. Ceci l'a conduit à s'intéresser de près au contexte physique associé à ce type de site subaquatique et à dégager une grille d'analyse tenant compte de paramètres comme la direction de la houle, la profondeur ou la nature du fond marin. Muckelroy démontra en particulier qu'en dépit d'un bruit intense associé à la dynamique locale sur des sites de naufrage à faible profondeur, la distribution des vestiges du navire pouvait être analysée en s'intéressant non pas aux positions individuelles des artefacts eux-mêmes mais à celles des centres géométriques des objets regroupés en classes en fonction de leur rôle initial à bord.

1.2. Lecture des états de surface des artefacts selon un chimiste

Des chercheurs anglo-saxons, en particulier australiens, dont Ian MacLeod, ont de leur côté approfondi dès les années 1980 les questions touchant la caractérisation des états physico-chimiques des artefacts sur des sites de naufrage, mettant l'accent sur les paramètres de même ordre associés au site sous-marin lui-même (MacLeod, 1989). MacLeod s'est intéressé aux gradients de corrosion associés à la profondeur et à la teneur en oxygène, plus forte sur des sites de grande turbulence proches de la surface (MacLeod, 1998). MacLeod a, dans ces circonstances, proposé un système opérationnel de mesures de potentiel électro-chimique *in situ* et mis en évidence le fait que sur un site donné exposé à la houle, la corrosion d'objets métalliques varie en fonction de l'exposition physique d'un artefact au flux du ressac: un objet formant une forte saillie sur le fond marin s'oxyde plus rapidement qu'un objet de même morphologie reposant à plat sur le fond lui-même. On aborde par ce biais, sur un plan strictement descriptif, le thème de la «macro-rugosité» du site sous-marin.

L'analyse de MacLeod a également mis en évidence une forte corrélation entre l'épaisseur de la colonne d'eau et les phénomènes de corrosion du fer ou de l'acier sur des sites de naufrage modernes situés dans la tranche 0-22 m de profondeur.

1.3. Les pièces de monnaie comme témoins privilégiés de la dispersion

L'éclairage fourni par I. MacLeod a été déterminant dans notre étude car le chercheur australien a, le premier, caractérisé de façon qualitative les états de surface de certains artefacts privilégiés de l'analyse de dispersion du site sous-marin du *San Pedro de Alcantara* et suggéré une lecture inférentielle des phénomènes physico-chimiques sous-jacents. Cette analyse des états de surface, effectuée d'abord sur la base de macrophotographies de pièces d'argent du type *real de a ocho* (pièces de huit *reales* ou réaux), mettait en évidence les traces de cycles corrosion/abrasion observables sur les monnaies dont la distribution spatiale couvre par ailleurs l'ensemble du site sous-marin associé au naufrage de 1786.

Les «états» correspondant à l'aspect physique de ces pièces de monnaie provenant pour la plupart de l'atelier de la *Casa de Moneda* de Lima avaient depuis plusieurs années été ébauchés de façon intuitive par les participants des fouilles sous-marines familiarisés avec ces pièces d'argent dont le principal intérêt pour l'analyse spatiale était de faire partie d'une vaste population (1,5 million de *reales de a ocho* sur un total de cinq millions, le tout transporté en caissettes de bois) dispersée lors de l'accident du 2 Février 1786. L'essentiel avait été récupéré peu après lors des sauvetages espagnols des années 1786-1789).

Ce qui en restait, plusieurs milliers de pièces de monnaie ayant échappé aux yeux des sauveteurs d'antan, constituait un échantillon d'autant plus intéressant qu'il couvrait l'ensemble de la topographie du site sous-marin connu.

Dans ces conditions, les pièces de monnaie prenaient, pour les fouilleurs du site sous-marin, les aspects suivants:

A – Pièce entièrement couverte de concrétions calcaires, bien conservée à l'intérieur de cette enveloppe. Le taux d'intégrité de l'objet est fourni d'abord par l'aspect visuel (inscriptions, dates, figures, striation verticale de la périphérie du disque de la pièce originale).

B – Quand cette texture initiale reflète de la matrice d'origine a été attaquée soit par des phénomènes de corrosion, d'abrasion ou par une combinaison des deux, l'examen morphologique permet d'entrevoir un «gradient» de conservation sur la base du poids de la pièce (poids nominal 25 g au départ), de la distance morphologique à la forme circulaire originale et des variations d'épaisseur du disque original¹.

C – L'état suivant concerne des pièces partiellement ou complètement corrodées et usées par abrasion dont la texture varie depuis le métal «épais» creusé de cratères (corrosion) jusqu'au métal lisse. Au dernier stade, la pièce de monnaie apparaît comme un simple fragment de métal aplati et lisse, sans forme identifiable. Ce dernier état conduit d'ailleurs à une approche particulière pour le comptage des échantillons car la question se pose pour ceux de poids inférieur à 12,5 g de savoir si chaque individu représente un unique noyau original, une seule monnaie donc, ou si deux de ces noyaux usés et amincis peuvent provenir d'une seule et même pièce de monnaie.

D – La caractéristique la plus frappante toutefois parmi cette esquisse de typologie est la déformation physique, unique ou multiple, subie par certains objets retrouvés sur le site sous-marin.

Cette déformation apparaît aussi bien sous la forme d'un pliage que d'un poinçonnement ou d'un tranchage. Le phénomène est particulièrement apparent pour les deux pièces d'or trouvées sur la partie la plus profonde du site, l'une de ces pièces (n.º 2069/SPA1988, date lisible: 1779), ayant subi un écrasement qui se traduit par une fêlure dont les trois ramifications rayonnent à partir de la périphérie, la seconde monnaie d'or (n.º 3900, date lisible: 1780) ayant subi une coupure au profil irrégulier. L'hypothèse qu'il puisse s'agir simplement de rebuts de la *Casa de Moneda*, l'atelier d'émission monétaire de Lima, surgit naturellement à l'esprit pour ces deux grandes pièces d'or, seules du genre trouvées sur le site, dans la zone la plus éloignée de terre et à proximité l'une de l'autre. La question de l'origine de ces déformations reste ouverte. Des déformations d'un autre type apparaissent sur certaines pièces d'argent, cette fois sous la forme de pliage ou de poinçonnement, la «pathologie» (morphologie de la déformation) excluant dans ce cas l'hypothèse d'un rebut de l'atelier monétaire liménien.

Les fouilles sous-marines réalisées dans la zone ont mis en évidence par ailleurs la présence de vestiges associés à la proue du navire. Une forte fragmentation des vestiges, celle des céramiques par exemple, a permis de mettre l'accent sur la violence du choc initial au moment du naufrage. Il en est ressorti l'idée de «zone d'impact», cône de dispersion dont le sommet ou point initial a été défini par approximations successives au fil des campagnes sous-marines.

Celle de 1998, avant-dernière en date, a permis en particulier de localiser quelques rarissimes fragments de la carène du vaisseau dans la partie la plus profonde du territoire sous-marin associé au naufrage de Février 1786. L'examen de vestiges spécifiques de l'extérieur de la carène, dont les feuilles de doublage de plomb, est venu affiner cette approche, les multiples plissures de la feuille de plomb reflétant la cinétique de l'impact caractéristique des vestiges trouvés dans cette zone où abondent les marques de forte fragmentation.

Cette analyse de la dispersion renvoie aux données connues par la documentation manuscrite qui témoigne d'un navire éventré sur le fond rocheux alors qu'il marchait à six nœuds, par vent portant, avec dans son fond de carène une cargaison de 750 t de métal, dont 600 t de cuivre en barre, le reste étant composé de caissettes de bois contenant des pièces de monnaie. Le choc fut si violent,

rapportèrent les survivants, que le vaisseau éventré perdit d'un coup l'essentiel de son fond de carène dont la partie centrale resta figée au fond de la mer sous la masse de la cargaison de métal.

Ces témoignages d'époque éclairent dès lors l'étude spatiale de ce site de grande dispersion caractérisé par l'immobilisation brutale d'une carène de bois déplaçant dans ce cas précis quelques deux mille mètres cube d'eau à la vitesse de trois mètres par seconde et dont un tiers de la masse, constitué de métal chargé en cale, s'immobilisa d'un coup sous le choc.

L'analyse archéologique articulée avec celle de la documentation d'archives a permis d'isoler plusieurs phases de la dispersion et les périmètres correspondants sur le site sous-marin.

Le paramètre opérationnel majeur de cette analyse de dispersion est le concept de «distance au point d'impact» matérialisé par la distance directe ou euclidienne entre la position d'un artefact donné et celle du «Point d'Impact» défini à partir de la position et du mode de fragmentation des vestiges de la partie la plus profonde du site sous-marin. Précisons que les coordonnées de chaque artefact sont mesurées sur le site sous-marin par trilatération (mesure des distances directes sous l'eau au moyen d'un mètre-ruban et des profondeurs au moyen d'un profondimètre digital -0,1 m de résolution) autour d'un réseau de 91 repères tridimensionnels installés dans la roche-mère au cours de cinq campagnes (1988/96/97/98/99).

Chaque artefact étant par ailleurs pesé avec une précision de l'ordre de 0,03 g (pour les objets ou fragments jusqu'à 1200 g), un graphique de dispersion portant sur la «distance au point d'impact» des artefacts des campagnes de 1997 et 1998 a mis en évidence la présence de plusieurs «noyaux» de dispersion, trois au total². On remarque, une fois reporté sur la carte géographique du site, que le spectre angulaire du premier noyau de dispersion, de forme allongée, correspond à celui fourni par la documentation d'archives pour la marche du navire lors de l'impact (Blot, 1992, p. 30) tandis que l'axe médian du second noyau, orienté à environ 120° du premier, coïncide avec la direction de la houle de Nord Ouest qui règne sur l'endroit pendant une grande partie de l'année.

L'étape suivante de cette analyse préliminaire, exploratoire à ce stade, repose sur une description précise, quantifiable si possible, des artefacts sériels décrits et commentés plus haut (pièces de monnaie) associés à l'ensemble du territoire du naufrage.

Dans le but de dégager une grille descriptive précise permettant l'établissement futur de la carte des «états de surface» des artefacts sur l'ensemble du site sous-marin, un lot de douze échantillons fut examiné au laboratoire de tribologie de l'École Centrale de Lyon. Ce lot comprenait les deux pièces de monnaie en or évoquées plus haut ainsi que dix pièces d'argent. Ces dernières représentaient les états les plus courants trouvés sur le site pour ce type d'artefact, dont différents types d'abrasion, de corrosion ou de déformation d'origine mécanique.

Dans le cas d'une des pièces d'or, l'analyse tribologique a porté sur l'exploration des déformations. La problématique sous-jacente tient au fait que cette pièce d'or, qui, comme une seconde pièce de monnaie de même métal, porte la trace d'un choc violent, fut, tout comme cette dernière, trouvée dans le voisinage de la «zone d'impact».

2. Application de la tribologie dans le cadre du présent article

L'objectif de ce travail est d'analyser les différentes traces d'usure et de modification de la morphologie de la surface d'un lot de dix pièces en argent et de deux pièces en or.

Qualitativement on observe que les pièces en argent ont subi une modification importante de leur état de surface qui serait due en partie au phénomène de corrosion lors de leur immersion dans la mer mais aussi à des phénomènes d'abrasion. Les travaux de Ian D. MacLeod (1998) ont montré

qu'il existait une loi entre la vitesse de corrosion et la profondeur à laquelle se trouvent certains vestiges métalliques (fer ou acier). A partir de l'analyse qualitative et quantitative du micro-relief des pièces en argent nous allons classer les échantillons et tenter d'établir s'il peut exister un lien entre des paramètres pertinents d'état de surface et la profondeur à laquelle les pièces ont été retrouvées.

Les deux pièces en or laissent apparaître des marques de fissuration, d'écrasement de certains motifs et de déformation. Afin d'étudier quelles ont été les contraintes subies par les pièces nous allons analyser le macro-relief de l'une d'elles, afin de déterminer les zones de sollicitations. En utilisant des algorithmes de calcul qui analysent les déformations élastoplastiques des matériaux, nous allons tenter de déterminer une méthodologie permettant de remonter à l'effort qui a été nécessaire pour déformer les motifs des pièces.

Des rugosimètres optiques sont utilisés pour mesurer et caractériser le macro et le micro-relief des pièces.

3. Présentation des dispositifs de mesure de la topographie utilisés pour l'analyse des pièces

3.1. Échelles de mesure des principaux rugosimètres

Il existe sur le marché des rugosimètres qui permettent de mesurer des états de surface allant de l'échelle de l'angström à plusieurs millimètres d'altitude Fig. 1. Qu'ils soient tactiles ou optiques, ils présentent tous des résolutions différentes, il est donc nécessaire de choisir l'outil de mesure adapté à la fois à l'amplitude maximale du relief, à la résolution que l'on désire obtenir pour la caractérisation de la surface, à la taille de la surface que l'on désire analyser, mais aussi à la nature de celle-ci. En effet, pour des surfaces "molles" (aciers mous, polymères, ...) ou fragiles (films, dépôts) il est nécessaire d'utiliser un rugosimètre sans contact (optique) car la pointe en diamant du palpeur tactile exerce une pression de contact qui a pour effet d'endommager ce type de surface. Le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des systèmes dispose d'une gamme d'appareillages avec ou sans contact permettant de caractériser des états de surface d'amplitude allant du centimètre à l'angström.

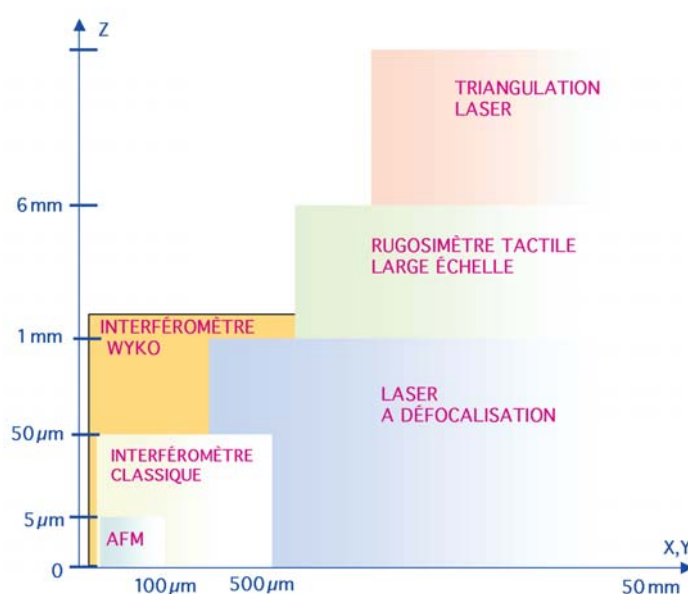


Fig. 1 Échelles de mesure des rugosimètres du laboratoire.

3.2. Dispositif de mesure du macro-relief des pièces en or

3.2.1. Introduction

Compte tenu qu'il s'agit d'identifier et d'analyser les déformations subies par le macro-relief des pièces en or, nous proposons d'utiliser comme outil un dispositif permettant de mesurer la surface totale de la pièce. L'amplitude du relief que l'on désire analyser étant supérieure au millimètre, nous avons donc choisi un rugosimètre laser à triangulation circulaire. Ce dispositif permet de mesurer des amplitudes de relief jusqu'à 10 mm, avec une résolution verticale de 1 μm .

3.2.2. Le rugosimètre laser à triangulation

Le principe de la triangulation circulaire repose sur la mesure d'une distance par un faisceau laser entre le capteur et la surface à analyser. La profondeur est calculée par triangulation et permet de reconstruire la géométrie d'une surface tridimensionnelle. Par rapport à la triangulation standard, la méthode circulaire permet de s'affranchir des problèmes d'ombrage. En effet, ce dispositif est équipé d'un capteur de position (PSD) circulaire, ce qui permet de recevoir sur 360° l'intensité lumineuse du laser, et ce quelque soit la nature topographique de la surface, Fig. 2.

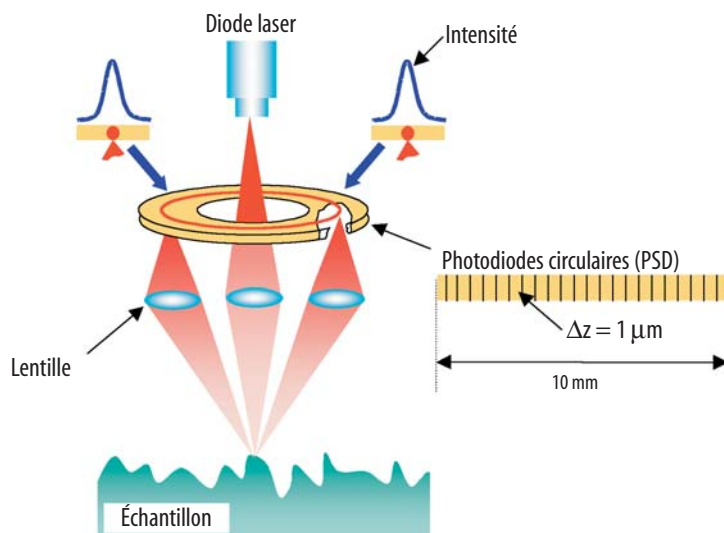


Fig. 2 Principe de la triangulation circulaire.

3.3. Dispositif de mesure du micro-relief des pièces en OR et en ARGENT

3.3.1. Introduction

Pour caractériser du micro-relief, il est important d'avoir une mesure de la topographie de la surface avec une bonne résolution verticale. Le rugosimètre que nous avons utilisé pour ce type d'analyse est un rugosimètre laser à défocalisation. Ce dispositif sans contact permet de mesurer des amplitudes jusqu'à 1 mm avec une résolution verticale maximale de 10 nm.

3.3.2. Le rugosimètre laser à défocalisation

Ce rugosimètre optique comprend un capteur optique et un ensemble de deux moteurs (X,Y) à courant continu. En plus de la saisie de l'information relative au signal topographique, ce système permet aussi de mesurer simultanément le signal en réflexion qui peut être notamment utilisé pour traiter des problèmes liés à l'aspect, à la brillance, ...

La tête de mesure optique est un système asservi qui fonctionne sur le principe émetteur récepteur. Une diode laser (émetteur) émet un faisceau lumineux sur la surface à mesurer et le signal réfléchi est renvoyé sur un ensemble de 4 photodiodes (récepteur). Un système asservi déplace une lentille afin d'obtenir sur les photodiodes une intensité lumineuse réfléchie maximale, on dit alors que le système est focalisé. A la focalisation le diamètre du spot sur la surface est de $1\mu\text{m}$. C'est la variation d'altitude du point de focalisation qui constitue le signal topographique, Fig. 3.

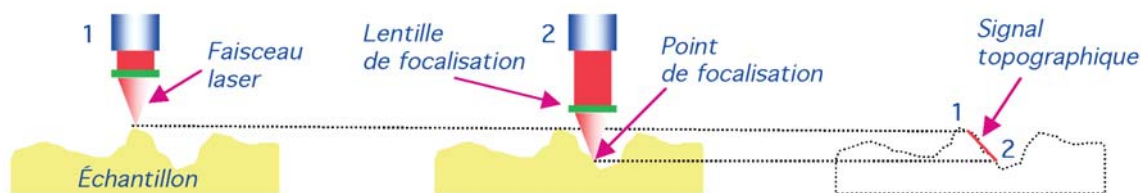


Fig. 3 Principe de la mesure optique.

4. Principe de la mesure 3D

Le passage d'une information $z(x)$ dans une direction donnée à une image tridimensionnelle $z(x,y)$, permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture d'une surface, étant donné la grande richesse que contient l'imagerie de la topographie d'un solide.

L'échantillonnage de la topographie d'une surface s'effectue par l'acquisition d'un certain nombre de points (256, 512, 1024) équidistants d'un pas régulier D_x (qui respecte le théorème de Shannon), l'opération est répétée sur un certain nombre de lignes (256, 512, 1024) équidistantes d'un pas régulier en y : D_y . Le cycle de la procédure d'acquisition est poursuivi d'une manière automatique de façon à balayer toute la surface à mesurer, Fig. 4.

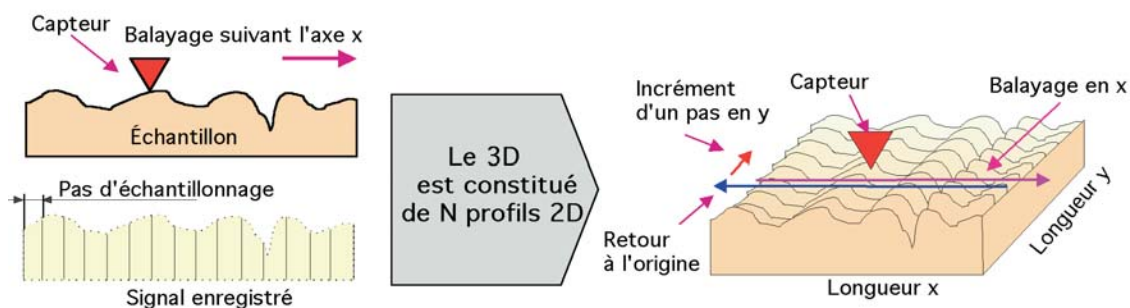


Fig. 4 Échantillonnage tridimensionnel d'une surface.

La mesure tridimensionnelle permet d'obtenir soit une représentation en vue 3D, soit en vue de dessus (2D), Fig. 5.

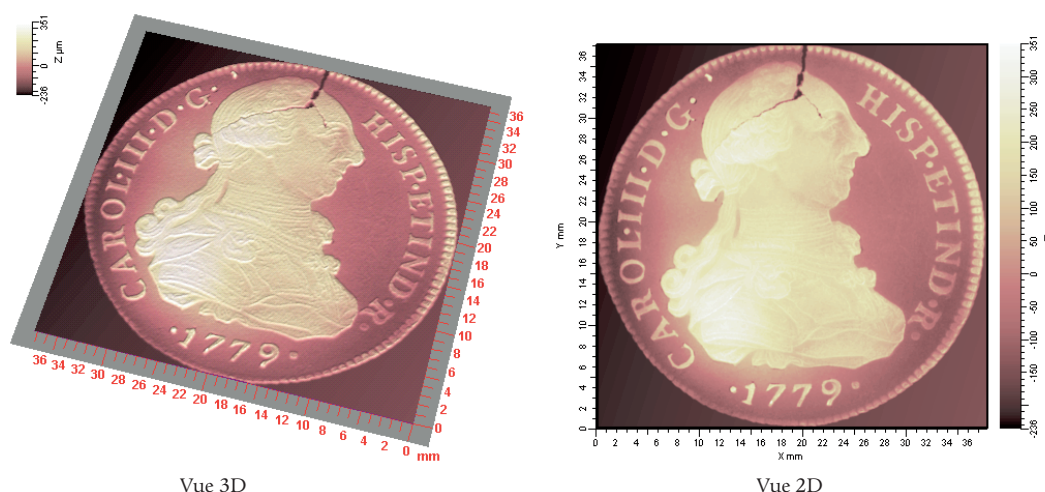


Fig. 5 Exemple de mesure pour la pièce d'or fissurée (n.º 2069).

5. Différentes composantes du signal $Z(x,y)$ d'une surface

Le signal tridimensionnel $Z(x, y)$ qui traduit la distribution des altitudes de la topographie d'une surface contient en général une série de composantes de longueurs d'onde et d'amplitudes différentes: $Z(x,y) = f(\lambda_i, \lambda_j)$, les longueurs d'onde λ_i, λ_j dépendent des conditions d'échantillonnage.

Par analogie avec la terminologie utilisée en profilométrie 2D, les principales composantes qui constituent l'information mesurée par un capteur de surfométrie, peuvent être de quatre types d'information occupant des bandes de longueur d'onde différentes, Fig. 6:

$$Z(x,y) = Z_D + Z_F + Z_O + Z_R$$

Avec:

Z_D la composante qui résulte d'un mauvais dégauchissage de la surface,

$$Z_F(x, y) = \sum_i \sum_j A_{ij}^{(F)}(\lambda_{Fi}, \lambda_{Fj}) : \text{composante de la forme de la surface.}$$

$$Z_O(x, y) = \sum_i \sum_j A_{ij}^{(O)}(\lambda_{Oi}, \lambda_{Oj}) : \text{composante de l'ondulation (macro-relief).}$$

$$Z_R(x, y) = \sum_i \sum_j A_{ij}^{(R)}(\lambda_{Ri}, \lambda_{Rj}) : \text{composante de la rugosité (micro-relief).}$$

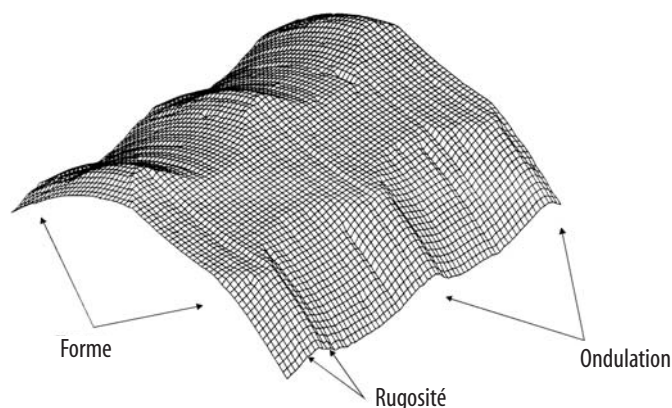


Fig. 6 Composantes Z(X,Y) d'une surface.

6. Paramètres tridimensionnels

Chaque paramètre est quantifié par rapport à une surface de référence qui est soit le plan moyen ou une surface géométrique définie par un polynôme pour les paramètres bruts, soit une surface basse fréquence issue du choix des longueurs d'onde de coupure d'un filtrage Gaussien. La détermination des paramètres s'effectue en considérant la fonction $\varphi(x,y)$ centrée par rapport à la surface de référence $\langle Z \rangle$:

$$\varphi(x,y) = \sum_i \sum_j Z_{ij} - \langle Z \rangle$$

6. 1. Paramètres 3D statistiques et d'amplitude

a) Paramètre caractérisant la moyenne arithmétique de surface *SPa*:

Moyenne arithmétique de toutes les valeurs de la rugosité après redressement seulement de la surface.

$$SPa = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |Z_{ij}(x,y)|$$

b) Paramètre définissant la valeur moyenne entre les sommets les plus hauts et les vallées les plus profondes *SPtm*, Fig. 7:

$$SPtm = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M R \max_{ij}$$

c) Paramètre définissant la valeur moyenne des vallées *SPvm*, Fig. 7:

$$SPvm = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [Z_{ij}(x) - Z_{moy}] \quad Z(x) > 0$$

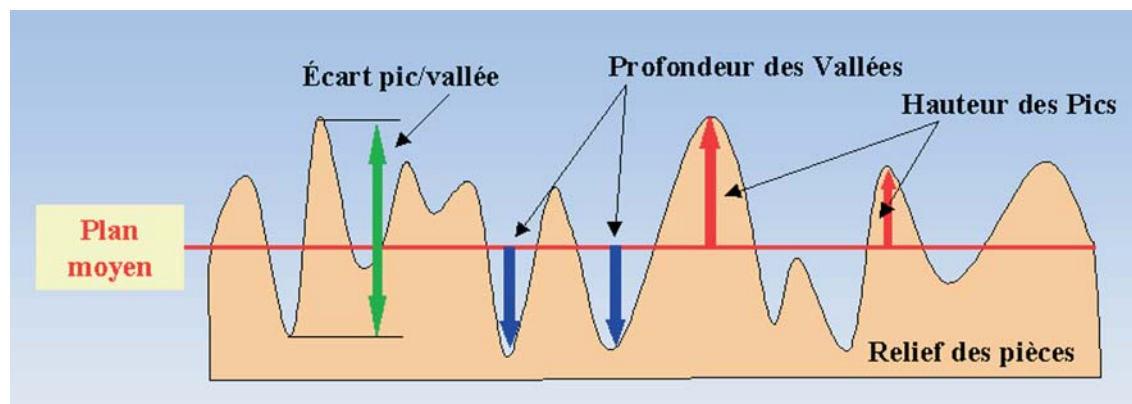


Fig. 7 Définition des paramètres SPtm et SPvm.

d) Paramètre $SPsk$ indiquant l'asymétrie de la surface:

Une valeur négative de Sk exprime la dominance des pores et des rayures, tandis que le signe positif indique une dominance des bosses ou des sommets.

$$SPsk = \frac{1}{NM} \frac{1}{Spq^3} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Z_{ij}^3(x, y)$$

e) Paramètre $SPek$ traduisant la finesse des motifs:

La valeur élevée de ce coefficient traduit une forte stabilité de la surface avec seulement quelques sommets ou vallées.

$$SPek = \frac{1}{NM} \frac{1}{Spq^4} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Z_{ij}^4(x, y)$$

f) Paramètre de la surface développée SDR:

La surface développée est définie comme le rapport de l'aire des surfaces élémentaires locales et l'aire de la zone mesurée. L'aire élémentaire est la petite aire du quadrilatère ABCD de la Fig. 8.

Ce paramètre est indicateur de la quantité de relief contenue dans une image par rapport à l'aire de la zone analysée.

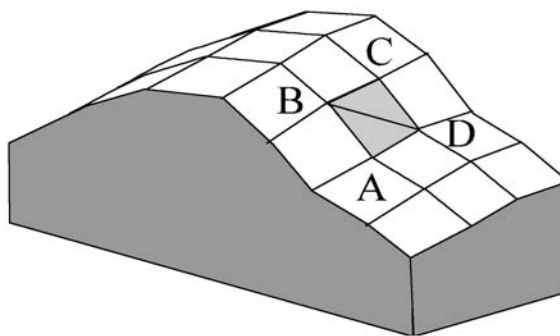


Fig. 8 Aire élémentaire.

7. Analyse du micro-relief des pièces en argent

7.1. Méthodologie

Sur chacune des pièces, nous avons analysé au rugosimètre laser à défocalisation, une zone de 2 x 2 mm, avec un pas d'échantillonnage de 4 μ m. L'analyse du micro-relief a porté sur les échantillons suivants provenant de trois zones (1, 2 et 3) du site du naufrage bien différenciées sur le plan du relief sous-marin et de la distribution des vestiges:

- **Zone 1:** la pièce 4021 provient du flanc oriental d'un plateau rocheux de roche-mère de la zone profonde.
- **Zone 2:** Les pièces 4017, 4071, et 4013 proviennent de la vallée juste à l'Est du plateau, à proximité ou dans le périmètre du carroyage de fouilles Q4. Cette partie plus profonde se trouve abritée des effets de la houle par le flanc quasi vertical du plateau rocheux.
- **Transition Zone 1 vers 2:** La pièce 4158, unique, provient de la partie du plateau la plus rapprochée de la terre.
- **Zone 3:** Les pièces 4025, 4026, 4027, 4041 et 4160 proviennent de la partie la moins profonde du site général, éloignée d'une centaine de mètre des zones 1 et 2, dans le voisinage des roches de la côte. Cette partie du site sous-marin correspond au début de la zone de grande turbulence par houle formée.

7.2. Filtrage des surfaces

Compte tenu que dans cette étude nous nous intéressons essentiellement au micro-relief, nous avons filtré la surface analysée en utilisant un filtre gaussien de longueur d'onde 400 μ m. L'image ainsi obtenue permet de caractériser uniquement le micro-relief de la surface des pièces.

La Fig. (9) illustre un exemple de filtrage de séparation du macro et du micro-relief.

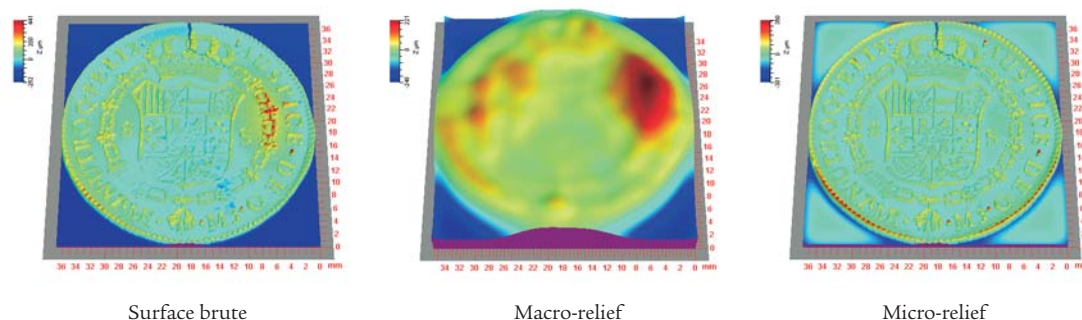


Fig. 9 Séparation du macro et du micro-relief de la pièce en or (n.º 2069).

7.3. Résultats des mesures du micro-relief

La surface a été mesurée avec le rugosimètre laser à défocalisation, pour une zone d'inspection de 1,8 x 1,8 mm.

7.3.1 Imageries 2D

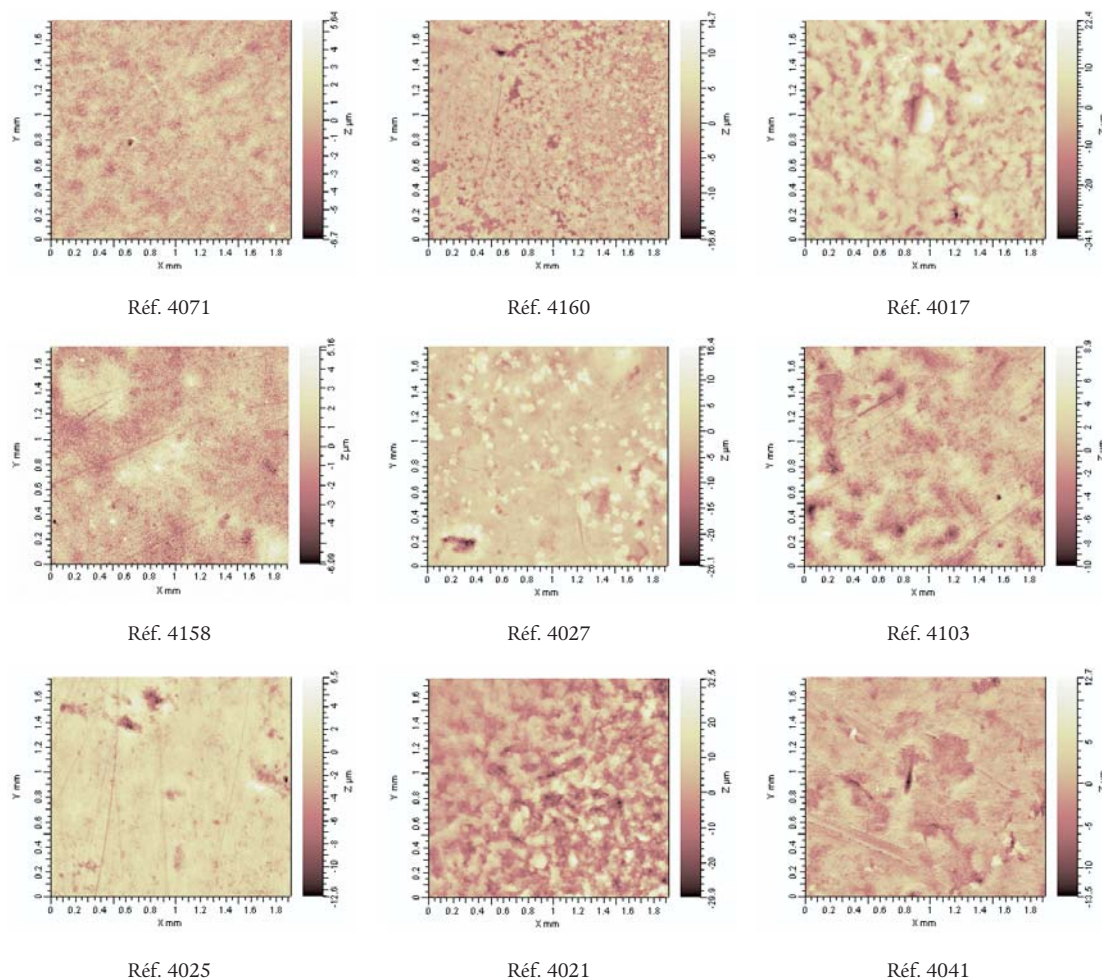


Fig. 10 Analyse du micro-relief des pièces d'argent (reales de a ocho).

7.3.2. Analyse qualitative

a) Pièce 4160

Corrosion par piquage de faibles amplitudes, avec présence de petits trous répartis uniformément sur l'ensemble de la surface. L'état de surface présente des plateaux avec une dominante de vallées par rapport aux sommets. On distingue quelques stries d'abrasion (Fig. 11), mais la formation des plateaux semble être due à de l'érosion.

b) Pièce 4027

Contrairement à la pièce 4160, dans ces conditions de corrosion on observe un état de surface essentiellement composé de pics (Fig. 12).

Les pics sont répartis de façon homogène sur l'ensemble de la surface.

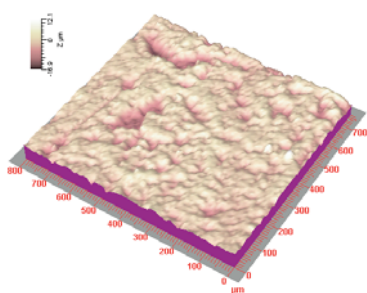


Fig. 11 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4160.

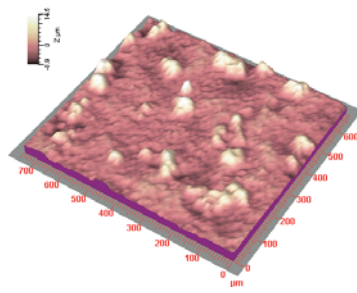


Fig. 12 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4027.

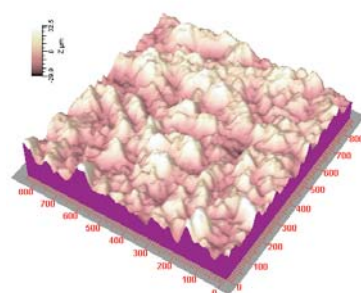


Fig. 13 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4021.

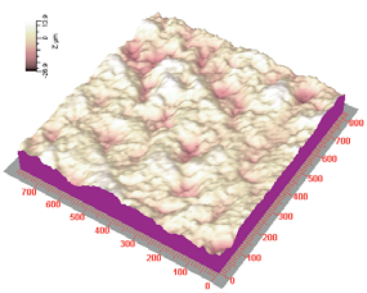


Fig. 14 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4017.

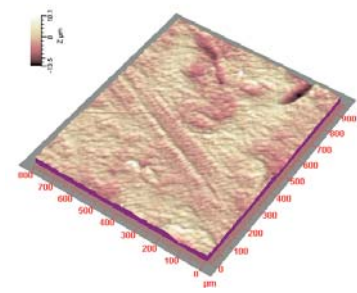


Fig. 15 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4041.

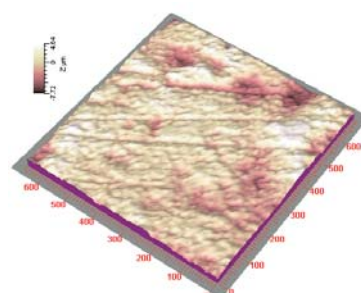


Fig. 16 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4103.

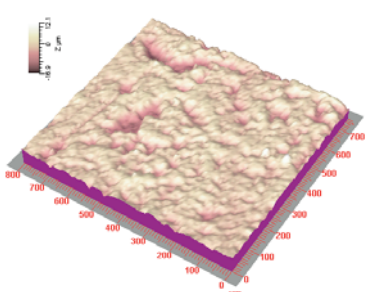


Fig. 17 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4025.

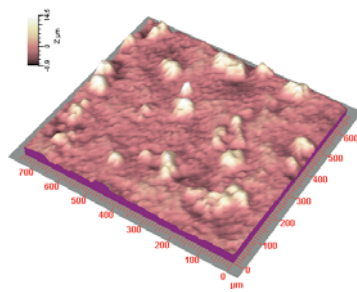


Fig. 18 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4158.

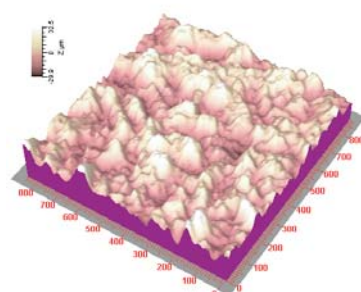


Fig. 19 Détail de la surface de la pièce (real de a ocho) n.º 4071.

c) Pièce 4021

Présence de corrosion par piquage avec une distribution de sommets plus importante que celle des vallées (Fig. 13).

d) Pièce 4017

Corrosion par piquage présentant un état de surface sous forme de sommets fortement érodés avec une répartition homogène de vallées profondes sur l'ensemble de la surface (Fig. 14).

e) Pièce 4041

Présence de corrosion caractérisée par la formation de cuvettes dont le diamètre est d'environ 300 μm.

La surface comporte des stries larges d'environ 150 µm et des stries beaucoup plus fines (Fig. 15). La différence de largeur des stries met en évidence deux types d'abrasion: un avec des grains fins et l'autre avec de gros grains.

f) Pièce 4103

Présence de quelques vallées de faible profondeur, l'état de surface fait penser à une corrosion du même type que celui de la pièce 4017 mais fortement érodée. Sur la surface on distingue de nombreuses stries fines d'abrasion orientées dans la même direction (Fig. 16), ce qui laisse penser que la surface a subi un polissage par du sable entraîné dans la même direction.

g) Pièce 4025

La surface présente la forme de plateau avec quelques vallées allant de peu profondes à très profondes. Les pics que l'on retrouve habituellement sur une surface corrodée comme la pièce 4021 ont été abrasés par des grains de sable, comme nous l'indique la présence de stries sur la surface (Fig. 17). Il s'agirait du même phénomène que la pièce 4103, à un stade plus avancé.

h) Pièce 4158

On distingue sur la surface de nombreuses stries fines (Fig. 18), ce qui dénote une usure abrasive de la surface ayant sans doute eu pour effet de supprimer les pics et les vallées de corrosion.

i) Pièce 4071

La morphologie de la surface de cette pièce ressemble à celle de la 4158 (Fig. 18), mis à part l'absence de stries (Fig. 19). L'arasement de la corrosion semble d'avantage lié à un phénomène d'érosion douce.

j) Commentaire

Compte tenu de ces observations, nous pouvons établir les regroupements de pièces suivants:

<i>Corrosion piquage</i>	<i>Corrosion érosion</i>	<i>Stries d'abrasion</i>	<i>Surface en plateaux</i>
4160	4071	4158	4160
4027		4025	4025
4021		4103	
4017		4041	

7.3.3. Analyse quantitative

a) Paramètres de rugosités

<i>Réf. Pièces</i>	<i>Spa (mm)</i>	<i>SPtm (mm)</i>	<i>SPpm (mm)</i>	<i>SPvm (mm)</i>	<i>SPsk</i>	<i>SPek</i>	<i>Sdev (%)</i>
4071	0,0005183	0,004056	0,0019313	0,0021251	-0,17	3,97	100,1
4158	0,0007836	0,004797	0,0024258	0,002371	0,52	3,58	100,1
4025	0,0008124	0,006644	0,0021982	0,0044461	-1,95	12,57	100,2
4103	0,0014535	0,009188	0,0039331	0,005255	-0,32	3,75	100,2
4041	0,0013916	0,011045	0,0049699	0,0060748	-0,62	5,18	100,4
4160	0,0014337	0,011785	0,0047756	0,0070093	-0,93	5,78	100,8
4027	0,0023251	0,018729	0,0106431	0,0080856	0,27	6,08	101,2
4017	0,0041385	0,028001	0,011856	0,0161446	-0,29	4,05	102,7
4021	0,0052522	0,033833	0,0179111	0,0159217	0,32	3,49	105

b) Proposition de corrélation entre la profondeur et les paramètres de rugosité

Réf. Pièces	Prof. (m)	Spa (mm)	SPtm (mm)	SPpm (mm)	SPvm (mm)	SPsk	SPek	Sdev (%)
4160	1,45	0,0014337	0,011785	0,0047756	0,0070093	-0,93	5,78	100,8
4027	3,47	0,0023251	0,018729	0,0106431	0,080856	0,27	6,08	101,2
4017	7,86	0,0041385	0,028001	0,011856	0,0161446	-0,29	4,05	102,7
4021	6,16	0,0052522	0,033833	0,0179111	0,0159217	0,32	3,49	105
Coefficient R ²		0,75	0,78	0,53	0,91	0,21	0,70	0,50

Réf. Pièces	Prof. (m)	Spa (mm)	SPtm (mm)	SPpm (mm)	SPvm (mm)	SPsk	SPek	Sdev (%)
4071	9	0,0005183	0,004056	0,0019313	0,0021251	-0,17	3,97	100,1
4158	5,98	0,0007836	0,004797	0,0024258	0,002371	0,52	3,58	101,1
4025	3,66	0,0008124	0,006644	0,0021982	0,0044461	-1,95	12,57	100,2
Coefficient R ²		0,88	0,90	0,36	0,77	0,41	0,65	0,68

Commentaire

La corrélation entre les paramètres de rugosité et la profondeur met en évidence l'existence de deux lots qui ne se corrélaient pas entre eux:

Lot de pièces 4160, 4027, 4021, 4017: Pour ce lot on obtient une bonne corrélation ($R^2=0,91$) entre le paramètre SPvm (profondeur de la vallée moyenne de la rugosité) et la profondeur d'eau des pièces. En effet, on observe que l'amplitude de la profondeur moyenne des vallées de la rugosité augmente en fonction de celle de la hauteur d'eau, Fig. 20. L'observation qualitative avait déjà mis en évidence un point commun entre ces surfaces: la corrosion par piquage.

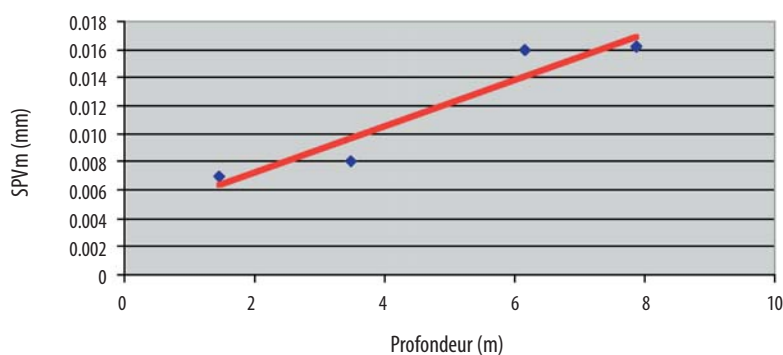


Fig. 20 Corrélation du paramètre SPvm.

Lot de pièces 4071, 4158, 4025: En faisant abstraction de la pièce 4071, le point commun entre les deux autres est la présence de stries d'abrasion. Cependant pour les trois pièces on constate une bonne corrélation ($R^2=0,90$) avec une diminution du paramètre SPtm en fonction de la profondeur de la mer, Fig. 21. En effet, la morphologie de ces pièces met en évidence une totale érosion de la corrosion par piquage, ce qui se traduit par une disparition des pics et des vallées, d'où une diminution du paramètre SPtm (altitude moyenne pics vallées).

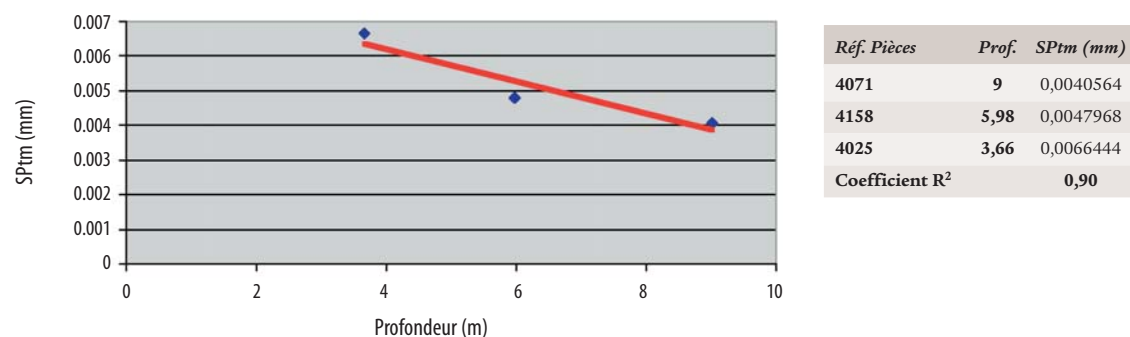


Fig. 21 Corrélation du paramètre SPtm.

7.4. Conclusion de l'analyse du micro-relief

L'analyse qualitative du micro-relief a mis en évidence l'existence de différents types d'altération de la morphologie de la surface des pièces en argent:

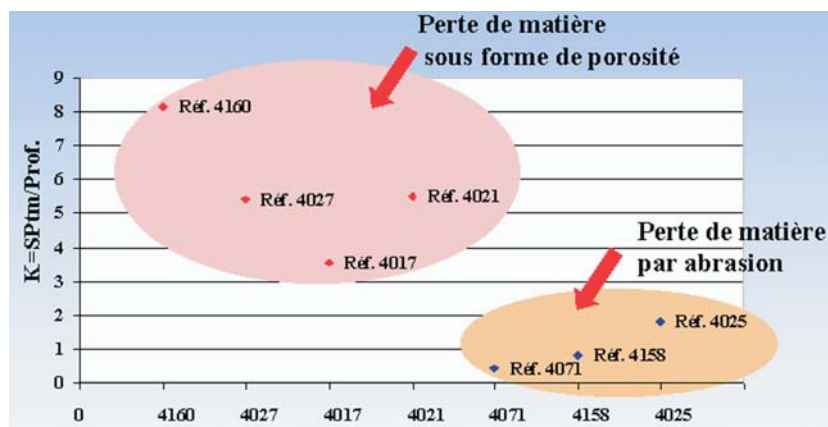
- Corrosion par piquage
- Corrosion par érosion
- Abrasion par des grains de sable avec possibilité de combinaison de ces phénomènes.

Lot 4160, 4027, 4021, 4017

Il existe comme point commun pour ces pièces une corrosion par piquage. On en distingue plusieurs types allant d'une altération de porosité de petit à très gros diamètre.

Lot 4071, 4158, 4025

Cet ensemble de pièces ne présente pas de corrosion par piquage distinct. La présence de stries d'abrasion laisse penser que l'état de surface initial a été modifié par un processus d'abrasion douce par des grains de sable. Compte tenu qu'il reste sur ces surfaces quelques vallées, on peut supposer que la corrosion par piquage représentait l'état initial, qui ensuite a subi des transformations d'abrasion. Ce phénomène est très net pour la pièce 4025.

Fig. 22 Classification par $K = \text{SPtm}/\text{Profondeur}$.

L'analyse des paramètres de rugosité tels que SPvm (profondeur de la vallée moyenne de la rugosité) et SPtm (altitude moyenne pics vallées), nous a permis d'explorer des corrélations en fonction de la profondeur de la mer. L'introduction d'un paramètre K (SPtm/Profondeur) a en particulier permis de différencier deux groupes de pièces de monnaie en fonction du mécanisme de perte de matière (perte de matière sous forme de porosité pour le lot des pièces 4160, 4027, 4021, 4017; perte de matière par abrasion pour le lot des pièces 4071, 4158, 4025), Fig. 22, mais il faut rester très prudent sur l'utilisation de ce type de résultats.

8. Analyse d'une pièce en or (n.º 2069)

8.1. Analyse du macro-relief

Afin d'analyser les déformées du macro-relief subies par la pièce, nous avons utilisé le rugosimètre laser à triangulation.

8.1.1. Résultat des mesures

a) Représentation avec la palette «or»

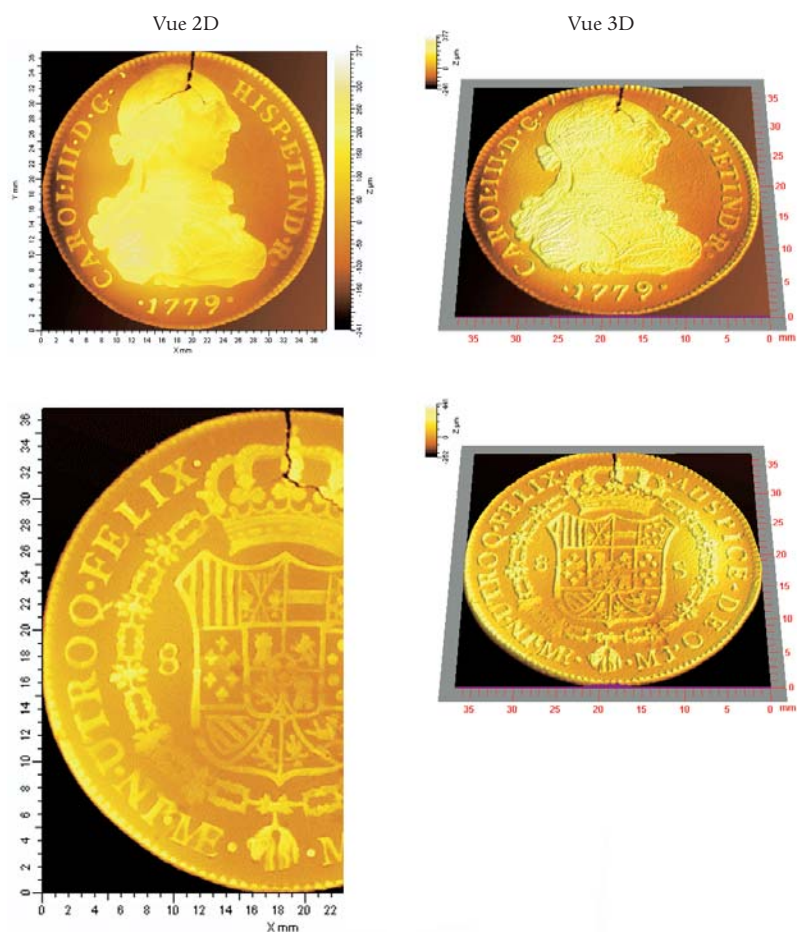


Fig. 23 Topographie de la pièce d'or (n.º 2069) – palette «or».

b) Représentation avec la palette "sine1"

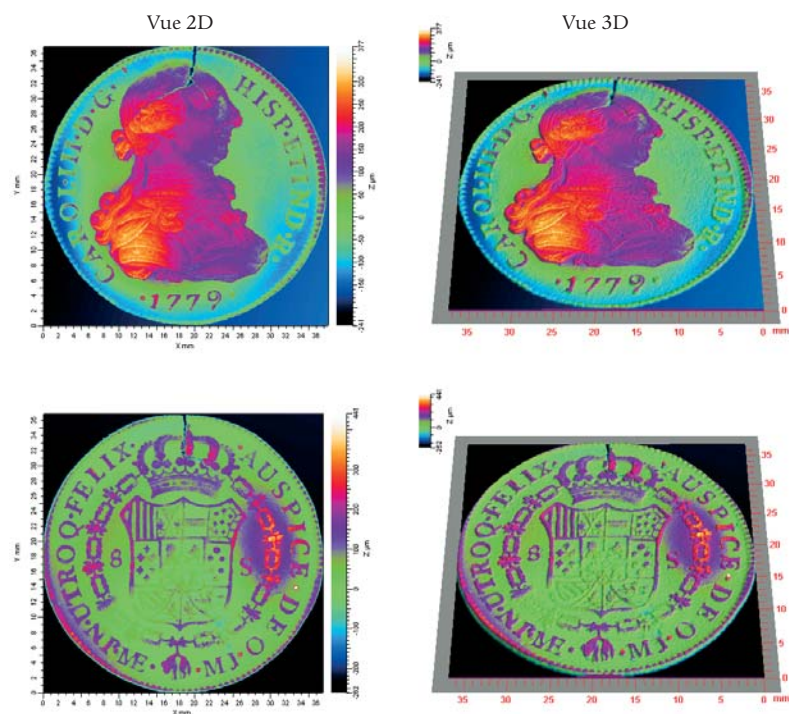


Fig. 24 Topographie de la pièce d'or: palette «sine 1».

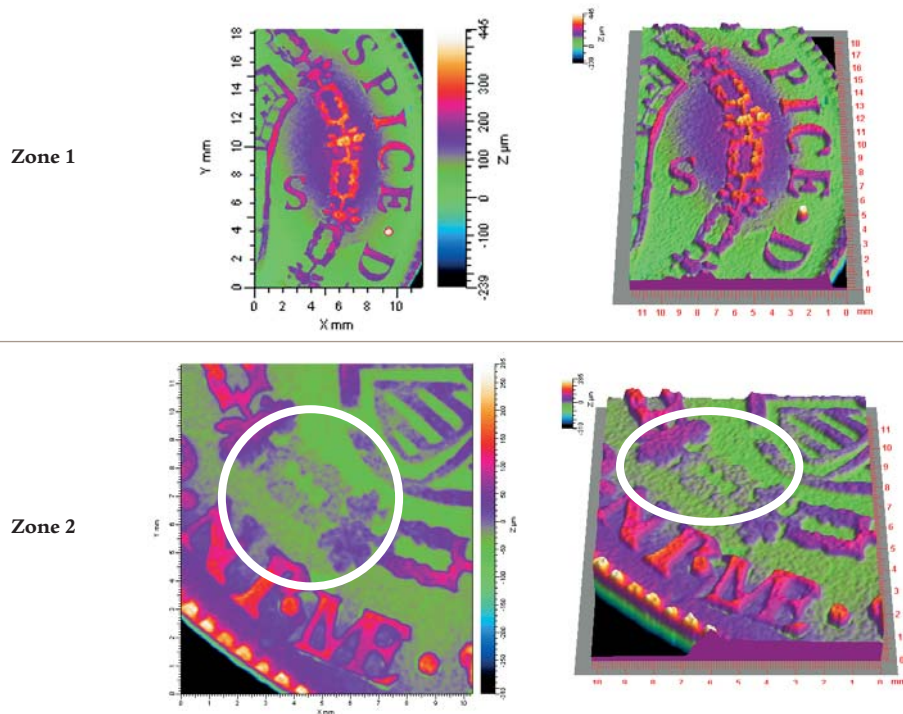


Fig. 25 Zones de déformations de la topographie.

c) Commentaire

La représentation avec la palette “sine1” met en évidence deux zones d’actions mécaniques localisées sur le côté «pile» de la pièce, Fig. 24.

La Fig. 25 met en évidence ces zones qui sont encadrées en blanc. Pour l’analyse de ces zones nous émettons les hypothèses suivantes:

Zone1: enfoncement de la pièce ayant entraîné une déformation ou défaut lors de la fabrication?

Zone2: écrasement ou érosion de la gravure?

8.2. Perspectives d’analyses

8.2.1. Analyse de la zone 1

La comparaison des deux zones symétriques (Fig. 26) met en évidence une déformation de la zone symétrique droite par rapport à celle de gauche.

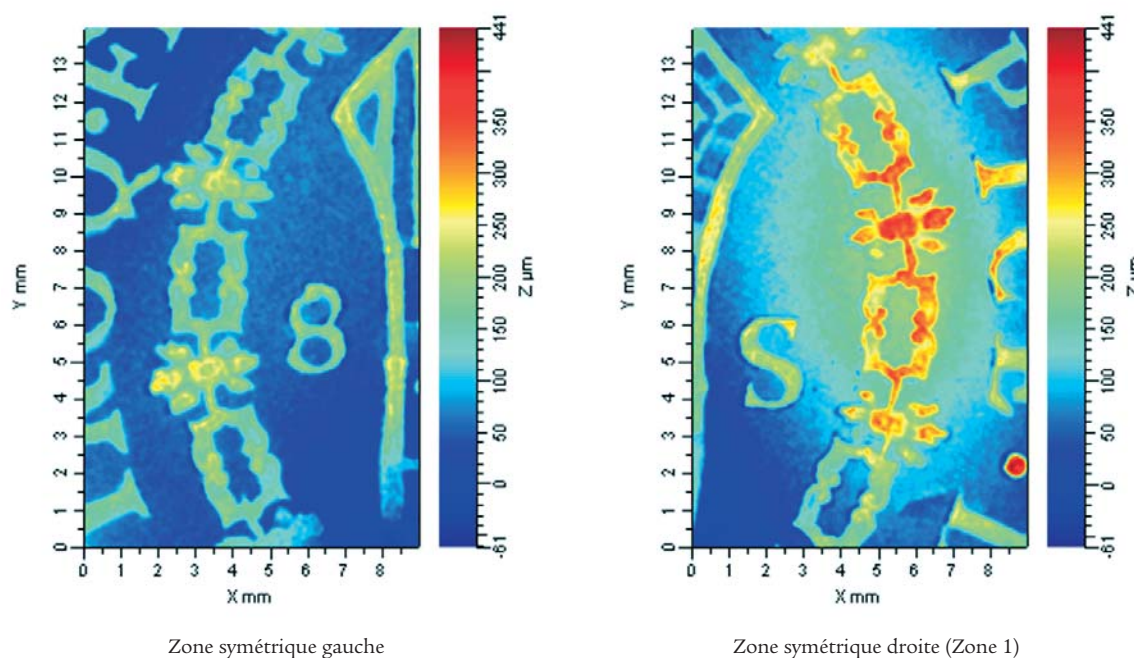


Fig. 26 Comparaison de la zone 1 et de la zone symétrique.

Afin d’identifier l’importance de l’amplitude de la déformation plastique subie par la zone 1, nous utilisons une méthode de filtrage gaussien. Celle-ci permet de séparer les basses fréquences (macro-relief) et les hautes fréquences (micro-relief) de la surface. Dans notre cas la déformation de la zone 1 est représentée par le macro-relief, Fig. 27.

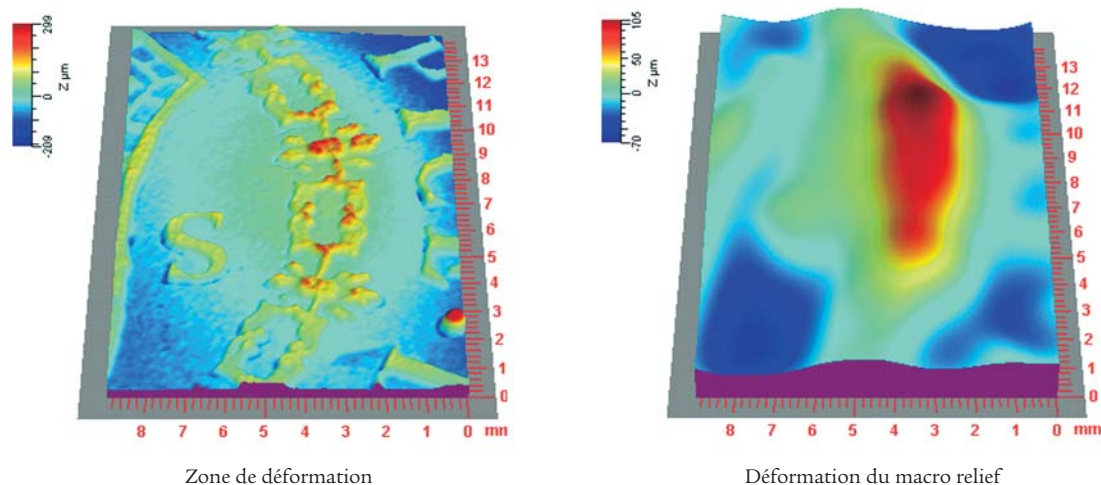


Fig. 27 Séparation des déformations du macro-relief.

Si l'on applique le filtrage à l'ensemble de la surface de la pièce, on peut alors comparer la différence d'amplitude Δz entre la zone 1 et la zone symétrique, comme nous le montre la Fig. 28. L'extraction d'un profil montre que la Δz est de l'ordre de $110 \mu\text{m}$.

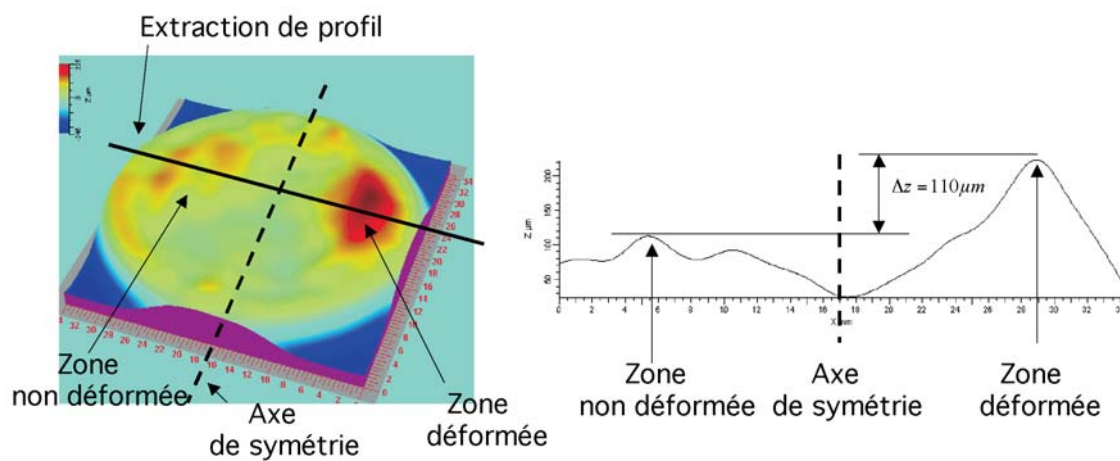


Fig. 28 Mesure de la différence d'amplitude Δz .

Compte tenu des données topographiques obtenues, les travaux en cours consistent à évaluer l'effort qui a été nécessaire pour déformer la topographie de la pièce de $110 \mu\text{m}$.

8.2.2. Analyse de la zone 2

Nous avons effectué des mesures avec le laser à défocalisation sur un motif non écrasé et sur celui supposé écrasé, Fig. 29.

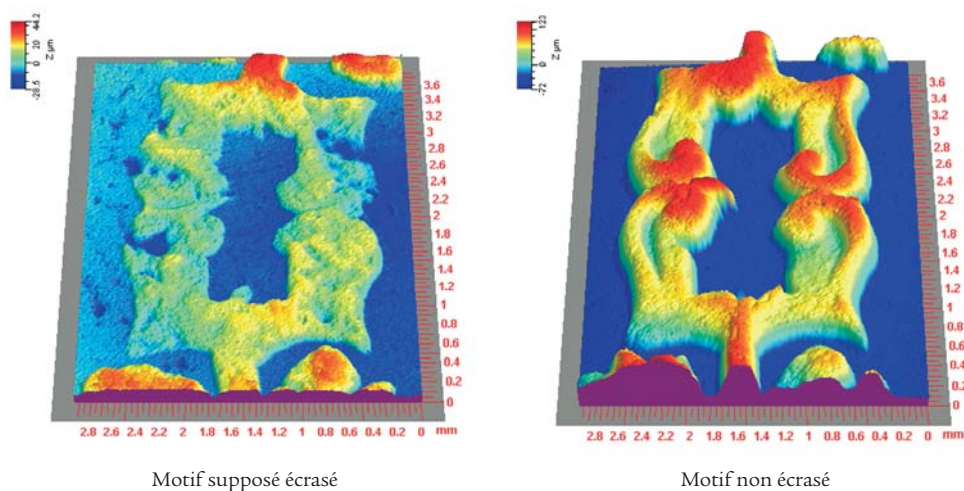


Fig. 29 Zones de déformations de la topographie.

Dans le cadre de la vérification de l'hypothèse de l'écrasement du motif, les travaux en cours reposent sur la simulation, à l'aide d'un algorithme de calcul, d'un contact plan/motif. La méthodologie consiste à mettre en contact un plan lisse à une certaine hauteur des sommets des aspérités, parallèlement au plan moyen (des moindres carrés) de la surface rugueuse $z(x, y)$, Fig. 30.

Cette approche permet de quantifier les paramètres de déformation élasto-plastiques à partir d'une profondeur d'écrasement et des propriétés intrinsèques du matériau.

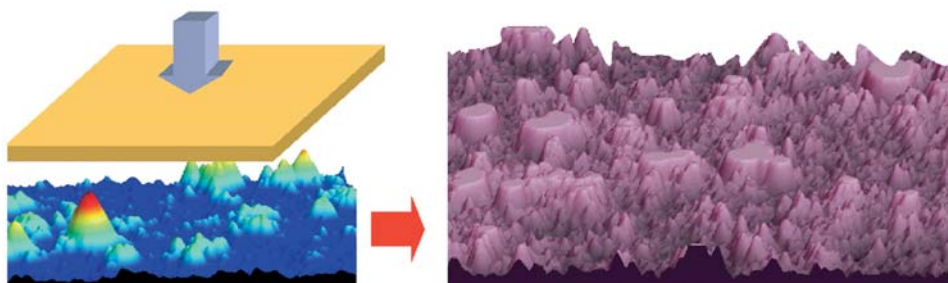
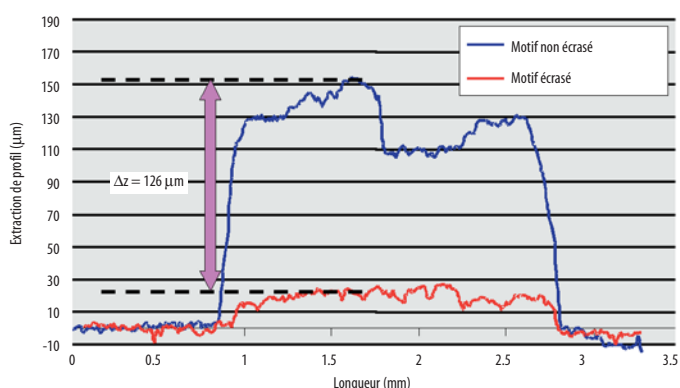


Fig. 30 Simulation de l'écrasement d'une surface par un plan.

Fig. 31 Mesure de la différence d'altitude Δz entre le motif non écrasé et celui supposé écrasé.

Si l'on considère un enfoncement donné, ce qui dans notre cas consiste à mesurer la différence d'altitude Δz entre le motif non écrasé et celui supposé écrasé, Fig. 31, on peut alors comme nous le montre la Fig. 32 remonter par calcul à l'énergie plastique restituée, ce qui nous permet de déterminer l'effort appliqué.

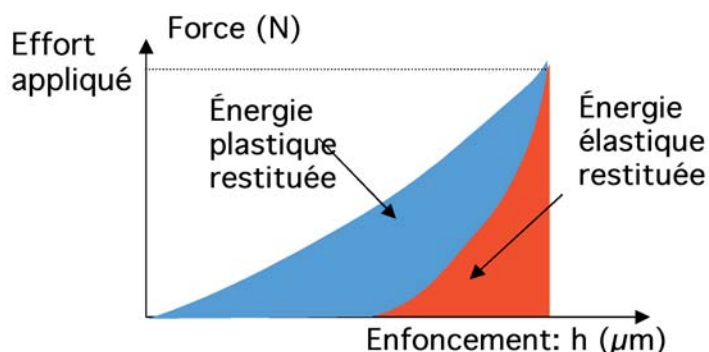


Fig. 32 Courbe de déformation élastoplastique.

8.3. Conclusion

8.3.1. Grille descriptive

Les analyses topographiques ont mis en évidence des déformations mécaniques de la surface de la pièce en or (n.º ref. 2069/SPA1988). Pour poursuivre les calculs de déformation proposés, il est nécessaire de réaliser des analyses complémentaires qui permettront de connaître les propriétés des matériaux telles que le module et la dureté. Ceci nécessite de réaliser des mesures de micro-indentation sur la pièce.

Quant à la micro-topographie des pièces d'argent, l'approche quantitative décrite plus haut permet désormais d'élaborer une grille descriptive d'ordre topologique applicable à la population entière de pièces de monnaies³ rassemblée depuis 1988 sur le site du *San Pedro de Alcantara* au cours de cinq campagnes archéologiques sous-marines menées avec l'appui du Musée National d'Archéologie de Lisbonne, de l'Institut Portugais du Patrimoine (IPPC, puis IPPAR) et du Centre Portugais d'Archéologie Nautique et Subaquatique (Institut Portugais d'Archéologie — IPA —, Lisbonne).

8.3.2. Les horizons multi-échelles de la rugosité

Par ailleurs, les outils de la tribologie se révèlent puissants à toutes échelles pour caractériser un relief. L'héritage des approches pionnières de Muckelroy pour l'analyse spatiale des sites sous-marins de grande dispersion et de celles de MacLeod pour la description analytique des états physico-chimiques des artefacts et de leur contexte in situ nous invite à explorer, pour la description du site sous-marin, le concept de *rugosité* du fait du rôle de la morphologie de la surface réceptrice (le fond marin) dans ces sites de grande dispersion à faible profondeur (Blot, 1998).

Ce paramètre classique de la tribologie se révèle particulièrement riche de promesses quand on l'applique, à une toute autre échelle, à la description topologique du site archéologique lui-même, territoire de la dispersion à l'étude. Tout site de naufrage du type 2 examiné au début de cet article (sites sous-marins de grande dispersion) met en effet en relief des concentrations d'objets ou des «vides» liés à la topographie (fentes et crevasses en opposition aux zones de roche lisse par exemple) et aux transports associés à la dynamique marine locale. L'approche de terrain permet de dégager, de manière intuitive au départ, une relation entre la «macro-rugosité» d'une zone donnée

et ce que nous appellerons son pouvoir de *capture*. Les artefacts capturés dans ces poches du relief sous-marin seront moins soumis aux phénomènes d'abrasion associés au transport de l'artefact sous l'action de la dynamique marine locale ou au mouvement des sédiments, sable en particulier, transportés par l'eau.

L'expérience décrite dans les paragraphes précédents a par ailleurs ouvert la question de la relation éventuelle entre certains paramètres des états de surface des pièces de monnaie du site du *San Pedro de Alcantara* et un unique paramètre descriptif du fond marin lui-même, la profondeur.

Là encore l'articulation avec la documentation d'archives relative au *San Pedro* permet de pousser plus loin l'exploration de la distribution des vestiges. Le moment du naufrage, entre 10 h 30 et 11 h du soir, heure locale, a permis, grâce à la collaboration d'une astronome de l'Observatoire de Lisbonne et des hydrographes de l'EPSHOM (Service Hydrographique de la Marine) de Brest, de situer le moment de l'impact quelques dizaines de minutes après le point le plus bas d'une marée à fort coefficient (0,5 m au-dessus du zéro hydrographique).

Dans ces conditions, le relief sous-marin mis en évidence sur le site lors des campagnes de fouilles a sans doute joué un rôle d'écran en direction de la terre pendant les premiers moments de l'accident, la marée montante combinée à la houle de Nord Ouest permettant par la suite aux plus massifs des vestiges de rejoindre la côte située à quelques dizaines de mètres vers l'Ouest, une centaine au plus vers le Sud-Est.

Le rôle des anfractuosités comme «capteur» d'artefacts est clair pour tout fouilleur de ce type de site. Les concepts d'analyse tridimensionnelle de la tribologie, multi-échelles de surcroît puisqu'ils s'appliquent à des séries de points connus en trois dimensions, pourront dans le futur permettre à l'archéologie une description quantifiée de cette *rugosité* des sites de grande dispersion à faible profondeur. Le levé topographique manuel de tels sites, de grande extension par définition et dans un contexte physique souvent turbulent pour l'opérateur, dépasse la capacité d'une équipe archéologique disposant d'outils classiques. L'avènement du relevé tridimensionnel automatisé par le biais des sondeurs de type multifaisceaux (*swath/multibeam sonar* en anglais) (Momber et Geen, 2000) ouvre un horizon nouveau permettant d'envisager la caractérisation dans un futur prochain, par le biais des outils vectoriels de la tribologie, de l'ensemble de la «macro-morphologie» d'un site archéologique sous-marin relevé avec une résolution de l'ordre du décimètre et d'explorer le rôle de cette «rugosité» dans des distributions archéologiques sous-marines de grande dispersion jadis considérées comme opaques ou aléatoires.

Remerciements

Les auteurs remercient le Musée National d'Archéologie de Lisbonne, le Centre National d'Archéologie Nautique et Subaquatique de Lisbonne (CNANS) et l'Institut Portugais d'Archéologie (IPA) pour la fluidité des démarches administratives qui permirent l'étude des échantillons au laboratoire de tribologie de l'École Centrale de Lyon.

NOTES

- * Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes
UMR CNRS 5513
École Centrale de Lyon
36, Av. Guy de Collongue
69131 Ecully - France
- ** Consultant du Centro Nacional de Arqueologia Náutica e Subaquática, Instituto Português de Arqueologia
Avenida da Índia, 136
1300-300 Lisboa - Portugal
- ¹ Une approche strictement qualitative a même été esquissée lors des campagnes SPA 1998-99 (Stéphane Gautron et Jean-Yves Blot, 1988-99, inédit) sur la base d'une grille de présences/absences, sur chaque pièce de monnaie d'argent, des signes provenant de la frappe monétaire elle-même dans les ateliers de Lima au Pérou entre 1779 et 1783.
- ² Ces trois noyaux sont bien visibles dans le graphique de dispersion portant en abscisse la distance au point d'impact et en ordonnée le poids de l'artefact. Pour une question de lisibilité du graphique, les valeurs numériques sont introduites dans une échelle logarithmique qui permet d'optimiser la séparation des noyaux de dispersion (Blot, J-Y (1999), *Relatório da campanha submarina San Pedro de Alcantara* 1998. Rapport remis au CNANS, Instituto Português de Arqueologia, Lisbonne. Inédit).
- ³ Lors d'un bref séjour au Portugal en Septembre 1999, I. MacLeod a pu effectuer des mesures in situ sur plusieurs pièces d'argent en plusieurs endroits du site sous-marin et caractériser les paramètres électro-chimiques associés à cet environnement. Ce même chercheur a, à cette occasion, examiné les exemplaires de pièces d'argent recueillis sur le site sous-marin du *San Pedro*

BIBLIOGRAFIA

- BLOT, J.-Y.; BLOT, M. L. (1991) - Le naufrage du San Pedro de Alcantara. *La Recherche*. Paris. 22:230, p. 334-342.
- BLOT, J.-Y.; BLOT, M. L. (1992) - *O Interface História-Arqueologia: o Caso do «San Pedro de Alcântara» (1786)*. Lisboa: Academia de Marinha.
- BLOT, J.-Y. (1998) - First steps in the Analysis of a Ship Overload. *Archaeological Computing Newsletter*. Oxford. 51, p. 1-8.
- GEORGES, J.-M., ZAHOUANI, H., VARGIOLU, R. (2004) - Divers visages de la tribologie. *Dossiers d'Archéologie*. Dijon. 290, p. 4-7.
- MACLEOD, I. (1989) - The application of corrosion science to the management of maritime archaeological sites. *Bulletin of the Australian Museum of Maritime Archaeology*. 13:2, p. 7-12 (traduction en portugais (2001) - A aplicação das ciências da corrosão na gestão de sítios arqueológicos marítimos. *Al-madan*. Almada. II^a série. 10, p. 50-58).
- MACLEOD, I. D. (1998) - In situ corrosion studies on iron shipwrecks and cannon. The impact of water depth and archaeological activities on corrosion rates. In *Metal 98: Proceedings of the International Conference on Metals Conservation*. Draguignan-Figanières. London: James & James Science Publishers, p. 116-124.
- MACLEOD, I. D.; SCHINDELHOLZ, E. J., ROBINSON, B., VERALL, M. (2004) - Silver Corrosion in turbulent conditions: the wreck of San Pedro de Alcantara. In *Metal 2004: triennial Metals Conservation Conference*. Metals Working Group of ICOM Committee for Conservation. Canberra: National Museum of Australia (en preparation).
- MARTIN, C. (1998) - Darmouth: the archaeology and structural analysis of a small seventeenth century English warship. In BOUND, M., ed. - *Excavating Ships of War*. International Maritime Archaeology Series. Oxford. 2, p. 110-119.
- MOMBER, G.; GEEN, M. (2000) - The application of the Submetrix ISIS 100 Swath Bathymetry system to the management of underwater sites. *International Journal of Nautical Archaeology*. Portsmouth. 29:1, p. 154-162.
- MUCKELROY, K. (1975) - A Systematic Approach to the investigation of Scattered Wreck Sites. *International Journal of Nautical Archaeology*. 4: 2, p. 173-190.
- MUCKELROY, K. (1978) - *Maritime Archaeology*. Cambridge. Cambridge University Press.
- STOUT, K. J.; SULLIVAN, P. J.; DONG, W. P.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T. G.; ZAHOUANI, H. (1993) - *The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions*. Editor: Commission of the European Communities.
- ZAHOUANI, H. (1998) - Spectral and 3D Motifs Identification of Anisotropic Topographical components. Analysis and Filtering of Anisotropic Patterns by Morphological Rose Approach. *International Journal of Machines, Tools and Manufacturing*. 38: 5-6, p. 615-623.
- ZAHOUANI, H.; VARGIOLU, R.; LOUBET, J.-L. (1998) - Fractal models of Surface Topography and Contact Mechanics. *International Journal of Mathematical and Computer Modeling, special issue, Recent Advances in Contact Mechanics*. New York. 28:4-8, p. 517-534.
- ZAHOUANI, Z.; LEE, S.-H.; VARGIOLU, R. (1999) - The Multi-Scale Mathematical Microscopy of Surface Roughness. Incidence in Tribology. In DOWSON, D., ed. - *Lubrication at the Frontier*. Amsterdam: Elsevier Science, p. 379-390.
- ZAHOUANI, H., SIDOROFF, F. (2001) - Rough surfaces and elasto-plastic contacts, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Series IV - Physics,. Paris: Académie des Sciences. 2: 5, p. 709-715.
- ZAHOUANI, H., VARGIOLU, R., ANDERSON, P. (2003) - Etude tribologique du processus d'usure des lames de silex et fonctionnement du tribulum. In ANDERSON, P.; CUMMINGS, L. S.; SCHIPPERS, T. K.; SIMONEL, B., eds. - *Le traitement des récoltes: un regard sur la diversité, du Néolithique au présent*. XXIII^e Rencontre Internationale d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, 2003. Antibes: ADPCA (Association pour la promotion et la diffusion des connaissances archéologiques), p. 439-454.