

دراسة ميكرومورفولوجية لعينات حديدية أثرية متآكلة،
 باستعمال المجهرية البصرية، مستخرجة من موقع "الجزر
 الثلاث" بشرشال (الجزائر): وصف مظاهر التآكل.

Micromorphological study of some corroded archaeological iron remains using optical microscopy from the site of "Les Trois Ilots" (Cherchell, Algeria): description of corrosion. □

بسطة مروان معمر^{1*}؛ فيلاح محمد المصطفى².

¹. معهد الآثار؛ جامعة الجزائر 2؛ (الجزائر).

- البريد الإلكتروني: Mr_bassata@yahoo.fr

². معهد الآثار؛ جامعة الجزائر 2؛ (الجزائر).

- البريد الإلكتروني: filahmoustapha@gmail.com

تاريخ الإرسال: 2023/02/14؛ تاريخ القبول: 2023/03/17؛ تاريخ النشر: 2023/06/09.

الملخص:

يمثل هذا المقال دراسة مجهرية مورفولوجية لمجموعة من القطع الحديدية الأثرية المستخرجة من موقع الجزر الثلاث الروماني المتواجد في مدينة شرشال الجزائرية، وذلك باستعمال المجهرية انعكاسية الإضاءة على مقاطع مصقولة. وجهت الدراسة بصفة خاصة نحو تمييز مظاهر التآكل ونظامه بغية الحصول على معطيات لفهم العوامل المتحكمة فيه، وبالتالي الاستجابة لإشكاليات الحفظ والصيانة المتعلقة أساسا بمدى تقدم التآكل في القطع المعدنية الحديدية ووجود

الأطوار الكلوريدية وما تحدثه من تآكل نشيط. تسمح النتائج التي تم الحصول عليها بتوجيه تدخلات العلاج والوقاية اللازمة لحماية قطع الحديد الأثري المستخرج من موقع الجزر الثلاث.

الكلمات المفتاحية: المورفولوجيا الدقيقة؛ الحديد الأثري؛ موقع الجزر الثلاث؛ تآكل؛ البنية المجهرية.

Abstract:

This article presents a micromorphological study by reflection microscopy of some archaeological irons extracted from the Roman site of Trois Îlots located in the city of Cherchell in Algeria. The study was oriented in particular towards the characterization of the corrosion system and these aspects, in order to obtain elements of understanding of the factors which control it, as well as to respond to conservation issues concerning the progress of corrosion in the ferrous objects and the presence of chloride phases likely to cause resumption of post-excavation corrosion. The results obtained will therefore make it possible to better direct the necessary stabilization and prevention interventions for all the archaeological remains at the Trois Îlots site.

Keywords: micromorphology; archaeological iron; Trois Îlots site; corrosion; microstructure.

مقدمة:

إن فهم آليات تآكل الحديد لموقع أثري ما أمر مهم للغاية سواء لمجال الآثار أو مجال الحفظ والترميم، أحد جوانب الجزء الأول من هذين المجالين هو اهتمام المتخصصين بتحديد السطح القديم لمعدن متآكل، أو ما يُطلق عليه أيضاً بالسطح الأصلي أو السطح الأثري، إذ يعد مصدراً مهماً للمعلومات حول الشكل الأصلي للقطعة ووظيفتها واستخداماتها قبل التخلي عنها. أما فيما يخص الجانب الثاني، فإن تقييم حالة القطع الحديدية وتمييز طبيعة نواتج ومظاهر تآكلها

ضروري لتوجيه اختيارات الصيانة والعلاج، إلا أن الطبيعة المعقدة للقطع الحديدية الأثرية المتآكلة وبالأخص تلك المستخرجة من الأتربة يستوجب فحصا دقيقا ومعرفة جيدة بمسارات التآكل.

إن المناهج المختلفة التي تم إجراؤها حتى الآن على الحديد الأثري المستخرج من الحفريات الأثرية في الجزائر لم يتعد الوصف العيني للقطع، وعلى الرغم من أن المناهج التقليدية المتأصلة في تخصص علم الآثار تؤدي إلى فهم جيد لأشكال القطع وماهيتها، إلا أن افتقارها لمقاربات على المستوى المجهرى يترك جوانب عدة متعلقة بطبيعة تركيب موادها ونواتج تآكلها. وفي هذا السياق جاء هذا العمل لوصف القطع الحديدية الأثرية لموقع الجزر الثلاث الروماني وصفا مجهريا محاولين فيه تحديد بعض أوجه التآكل من خلال المجهرية انعكاسية الإضاءة .

وبالنظر إلى كمالية اللقى الأثرية ونوع تحضير العينات "المهدم للعينة" التي تتطلبها الدراسة المجهرية، تم اختيار قطع حديدية "قابلة للتلف"، وهي عبارة عن مسامير وشظايا أدوات وظيفية غير معروفة، انتقينا منها ثمانية قطع والتي من خلالها يمكن تعميم نتائج الدراسة على مجمل اللقى المكتشفة في الموقع. قدم هذا العمل في ثلاثة محاور، حددت في الأول المصطلحات التي سيتم بها الوصف وعرضت في الثاني المنهجية والتقنيات التي استخدمت لتحقيق أهداف الدراسة، أما الثالث فقد تضمن وصف العينات وعرض النتائج.

1- مفاهيم عامة ومصطلحات:

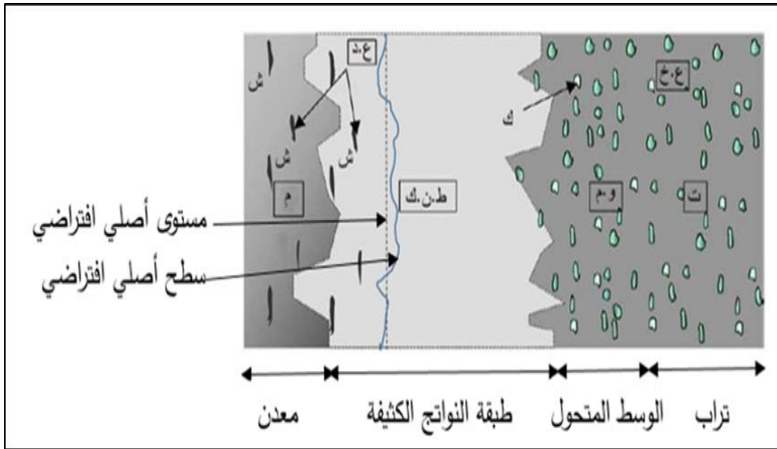
تختلف المصطلحات المعتمدة لوصف المعادن الأثرية حسب أهداف الدراسة، ففي مسعى تحديد شكل القطع وتفاصيل سطحها يوظف

مفهوم السطح الأصلي والمستوى الأصلي، حيث "يمثل السطح الأصلي للتحفة المعدنية حسب (Regis Bertholon et Caroline Relier: 1990: 185-189) الفاصل الذي يحدد بين كل ما ينتمي للتحفة وبين ما ينتمي للوسط الذي تكون فيه، أما المستوى الأصلي فهو مصطلح يوظف في حالة تغير موضع السطح الأصلي عن مكانه والذي يصبح غير معبر عن شكل القطعة". أما في وصف نظام التآكل، فيتم من خلال تمييز مختلف الطبقات المتشكلة إثر عملية التآكل وكذا الأطوار الموجودة فيها فضلا عن تمييز البنية المجهرية لم يبق من المعدن غير المتآكل وما يحتويه من شوائب. حددت مصطلحات هذا الوصف سابقا في أعمال نيف دالين وشركائها (NEFF Delphine and all: 2006: 2947-2970) الذين قاموا بدراسة متحددة المقاسات على مجموعة قطع حديدية مستخرجة من الأتربة، تم تحديد أربع طبقات منها وهي (الشكل: 1):

- **المعدن السليم (م)** الذي يمثل الجزء غير المتآكل من القطعة الحديدية الأثرية والذي يحتوي على بعض العناصر الخصوصية للنواة المعدنية مثل الشوائب (ش) حيث تدخل في البنية المجهرية للحديد بعد عملية التصنيع.
- **ثم طبقة النواتج الكثيفة (طن.ك)** التي تتميز بتجانس معتبر وكثافة عالية مشكلة أساسا من أكاسيد وهيدروكسيدات جيدة التبلور، كما تحتوي على بعض الشوائب الناتجة من المعدن تسمى بالعلامات الداخلية (ع.م)، مع احتمال وجود عناصر من وسط الطمر.
- **بعدها الوسط المتحول (وم)** الذي يمثل طبقة أقل تجانسا من طن.ك حيث من جهة من وعناصر مميزة للوسط كحبات الكوارتز

(ك) أو الفلزات الطينية...الخ، والتي تدعى بالعلامات الخارجية (ع.خ)، من جهة أخرى فإننا نجد فيه عناصر ومركبات ناتجة من انحلال الحديد مع احتمال حدوث ترسب وتكوّن نواتج تآكل ثانوية،

- وأخيرا التراب (ت) والذي يمثل جزء من وسط الطمر لم يتعرض لأي تأثير من التآكل، يعلق عادة حول الوسط المتحول للقطعة الحديدية الأثرية ونجد فيه عناصر من الوسط.



الشكل 1: مقطع عرضي لقطعة حديدية أثرية مستخرجة من حفرة أرضية حسب (Delphine Neff and all: 2006: 2947–2970)

إن الطابع العام للتآكل هو طابع كهروكيميائي يحدث بين مواقع أنودية وكاثودية يتأكسد فيها المعدن في المواقع الأنودية، ونظرا لاختلاف مواضع ومقاسات هذه المواقع فإنه سيكون للتآكل عدة مظاهر (الشكل: 2) معروفة بالمصطلحات التالية:

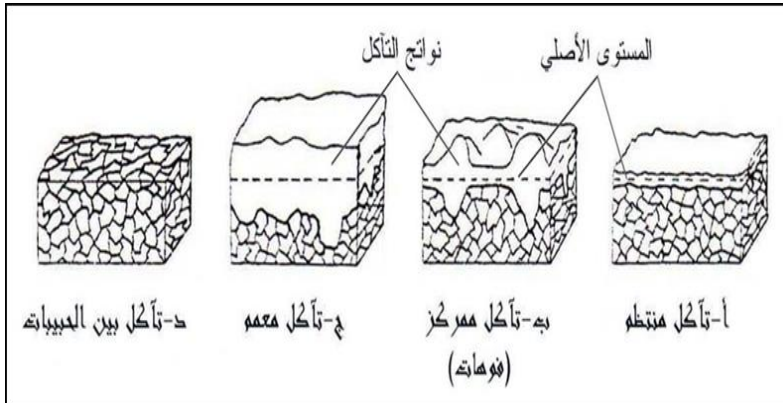
- **التآكل المنتظم:** يتميز بظهور طبقة نواتج تآكل منتظمة السمك على مستوى سطح المعدن، تتقدم بنفس السرعة تقريبا على كامل السطح، ويحدث عندما تكون المناطق الأنودية والكاثودية

قريبة لبعضها البعض (على المستوى المجهرى) (Lonel Jaubert: 2004 : 15).

• **التآكل الموضعي:** نقول عن التآكل أنه موضعي إذا كانت المواقع الأنودية والكاثودية متباعدة، فيتقدم التآكل على شكل فوهات وثقوب في المواقع التي تحتوي على عناصر دخيلة أو عوائق ميكانيكية باعتبارها مواقع أنودية (Regis Bertholon et Caroline Relier: 1990 : 177).

• **التآكل المعمم:** عندما تكون نواتج التآكل نفاذة (حالة نواتج تآكل الحديد) ويكون الوسط شديد الأكالية، فإن للتآكل الموضعي والمنتظم قابلية في التطور والتقدم على جل المعدن إلى غاية حدوث التوازن الكهروكيميائي (Lonel Jaubert: 2004 : 15-16).

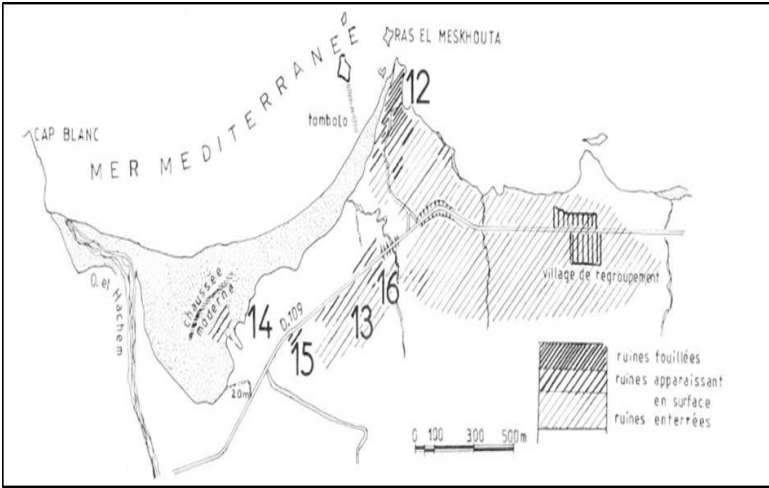
• **التآكل بين الحبيبي:** يحدث على مستوى وصلة الحبيبات باعتبارها مواقع أنودية، أي أن جهدا الكهروستاتي أقل من جهد الحبيبات التي تمثل المواقع الكاثودية (Herbert Henry Uhlig: 1970 : 13).



الشكل 2: مظاهر تآكل الحديد (Regis Bertholon et Caroline Relier, 1990 : 177).

2- عينات الدراسة:

تعود العينات الى موقع الجزر الثلاث الذي يبعد بثمانية كيلومترات شرق مدينة إيول قيصرية أو شرشال حاليا (الخريطة: 1)، والذي يمثل تعاقبا لعدة فترات تاريخية ممتدة من القرن الأول الى القرن السادس بعد الميلاد (Philippe Leveau, 1984 : 248-253).



الخريطة 1: موقع الآثار الرومانية للجزر الثلاث بشرشال. 12: الفيلا والكنيسة، 13: المقبرة، 14: الأفران، 15: المعاصر، 16: دوليوم وحجارة مشذبة (Philippe Leveau, 1984 : 248-253).

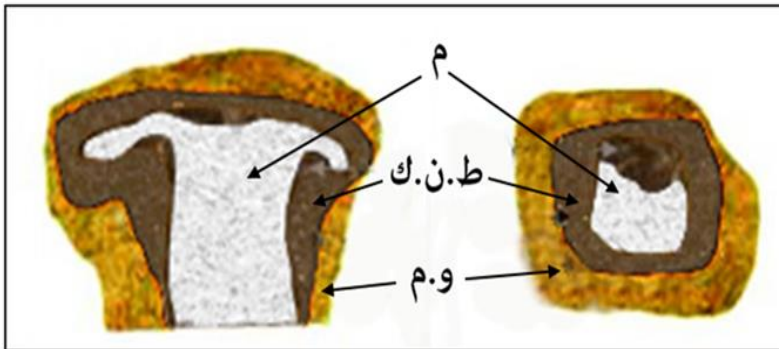
استخراج وتحضير العينات:

أقيمت الدراسة المجهرية على مقاطع عرضية لثمانية قطع حديدية (الجدول رقم: 1) حيث استخرجت القطع بالكومة في موقع الحفر الأثري للحفاظ على نظام التآكل كاملا، بعد ذلك جففت القطع في الأتون تحت الفراغ وفي درجة 50 °C ثم غمرت على البارد في راتنج ذو تصلب بطيء ووضعت بعدها في جهاز تفريغ الهواء لمدة 48 ساعة، تهدف هذه المرحلة إلى إفراغ الهواء الموجود في المسامية المفتوحة

للعينات من أجل نفاذ أكبر للراتنج على الأقل. باعتبار أن القطع المعدنية غير متجانسة فقد قمنا بإحداث مقطعين (عرضي وطولي) في العينة الواحدة (الشكل: 3) حتى يتسنى لنا دراسة أكبر مساحة ممكنة.

الجدول 1: معطيات تعريفية بالعينات الحديدية محل الدراسة.

رمز القطع	المنطقة	القطاع	الحيز/الغرفة	الطبقة	السير	المستوى	سنة الاكتشاف	رقم الجرد الكامل
Fe001					04	02	2014	TI,2014.Sn04Ni02.Fe001
Fe002	01	03	12Ch	002			2015	TI,2015.Zn01St03Ch12.Fe002
Fe003					04	03	2014	TI,2014.Sn04Ni03.Fe003
Fe004	01	03	12ch	002			2015	TI,2015.Zn01St03Ch12.Fe004
Fe005	01	01	01ch	002			2015	TI,2015.Zn01St01Ch01.Fe005
Fe006	04	02	H1	001			2016	TI,2016.Zn04St02EsH1C001.Fe006
Fe007	04	02	H2	001			2016	TI,2016.Zn04St02EsH2C001.Fe007
Fe008	04	01	H1	001			2015	TI,2016.Zn04St02EsH1C001.Fe008



شكل 3: تمثيل نظام التآكل.

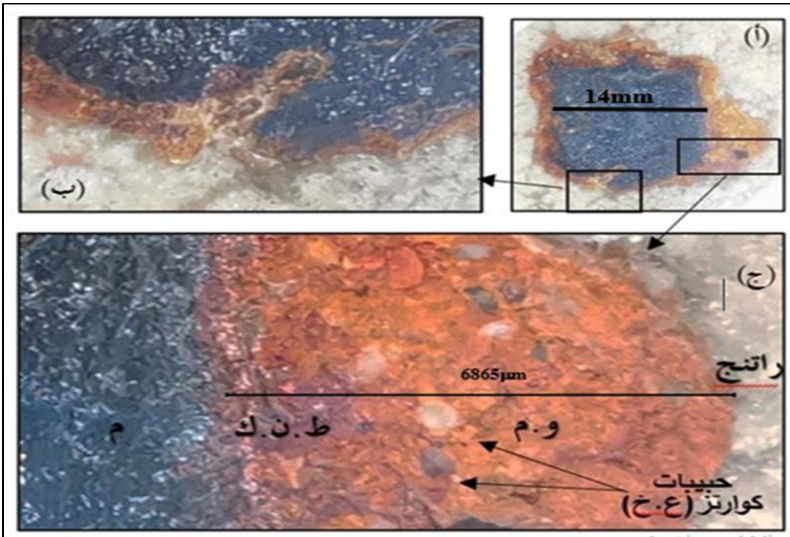
استعملنا في عملية القطع مادة أحادي-جزيء السيتيرين كمادة مُزلقة لتفادي تلف العينات بإعادة التأكسد ثم قمنا بتسوية أسطح

العينات باستعمال آلة الشحذ كمرحلة أولية تم صقلها بالورق ذو حبيبات أكسيد الألمنيوم وكربور السليسيوم (من درجة 400 إلى درجة 3000) كمرحلة ثانية، وأخيرا صقل نهائي باستعمال السائل الماسي 6، 3، و1 مكرون. تم الصقل بهذا الشكل التدريجي حتى نحصل قدر الإمكان على أسطح خالية من العيوب يمكن أن تعيق الدراسة المجهرية. استعملنا في هذه المرحلة الإيثانول كمادة مزلفة.

بعد هذا التحضير، مثلت العينات مقاطع تشمل كل طبقات التآكل كما يوضحه الشكل السابق.

3- منهجية الدراسة الوصفية:

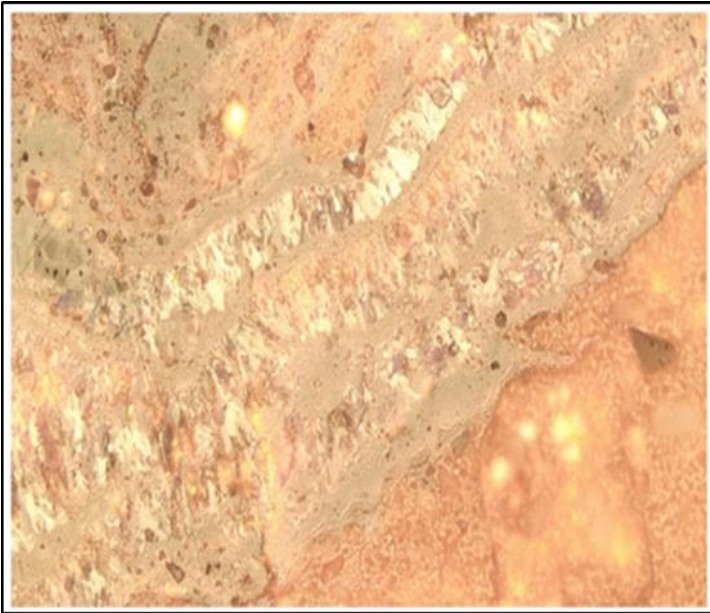
يعتمد البروتوكول التجريبي المقترح في هذه الدراسة على ملاحظة مورفولوجية لنظام التآكل باستعمال العدسة المكبرة والمجهر البصري للذان سيسمحان -كمراحل أولى من الدراسة- بتمييز أطوار التآكل الموجودة في طبقة النواتج الكثيفة فضلا عن تحديد شوائب التصنيع والمركبات المنتمية للوسط (الصور 1 و2).



الصورة 1: تمثيل نظام التآكل لعينة حديدية أثرية (العدسة المكبرة 10×)، موقع الجزر الثلاث (العينة Fe002)

أجريت الملاحظة الماكروسكوبية لمختلف أجزاء نظام التآكل باستعمال عدسة مكبر من نوع (Optika 10×) تحت ضوء أبيض مرفق بآلة تصوير MPx intégré 3.2. أما الدراسة المجهرية فقد تمت باستعمال مجهر من نوع أكسيون (Oxion) ذو إضاءة منعكسة من مخبر معهد البصريات وميكانيك الدقة بجامعة فرحات عباس سطيف 2. هذا الجهاز مزود بخمسة عدسات مكبرة (5×، 10×، 20×، 50× و 100×) وكمرا رقمية (CMEX-5f5.0 MP) ومجهر بصري من نوع NIKON Eclipse 50i Pol مجهز بأربعة عدسات تكبير (4×، 10×، 20×، 40×) تحت ضوء أبيض ومرفق بآلة تصوير NIKON Digital Sight DS-U 5.2 MP من مخبر الميكرومورفولوجيا AGROPARISTEC، قرينيون،

فرنسا.



الصورة 2: صورة مجهرية بتكبير 200× (العينة Fe008).

تمت هذه الملاحظة على مرحلتين، مرحلة أولى دون استعمال كاشف كيميائي لمعينة مرفولوجية نظام التآكل، وتقييم سمك طبقاته من خلال تدرج الألوان التي تظهره مختلف نواتج التآكل، ومرحلة ثانية باستعمال "كاشف كيميائي من أجل فحص وصلات الحبيبات ومختلف الأطوار على غرار الطور الكلوريدي، وكذا الاختلافات في اتجاه الحبيبات والبنية الدقيقة. استعمل كاشف النيتال المكون من 2 مل حمض النيتريك HNO_3 مخفف في 100 مل من الإيثانول C_2H_5OH لمهاجمة السطح المعدني للعينات.

للحصول على مقاطع كاملة لنظام التآكل، تم مسح كل العينات من خلال المجهر البصري ثم دمجها بواسطة برنامج معلوماتي كما توضحه (الصورة رقم 3).



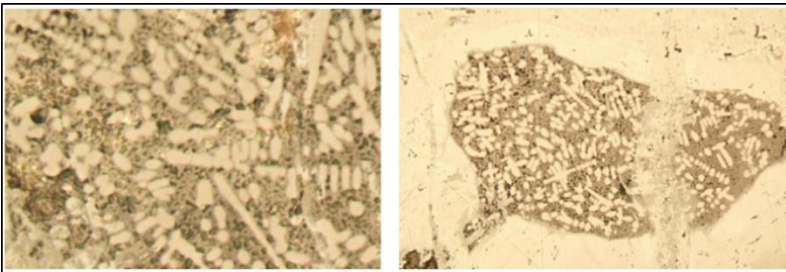
الصورة 3: مقطع عرضي لصور مجهرية مدمجة للعينة Fe008.

وصف وتحليل:

كما تم شرحه أعلاه، يتكون نظام التآكل للحديد الأثري من المعدن ونواتج تآكله، على هذا الأساس تم وصف المقاطع المصقولة وذلك بشكل طبقي:

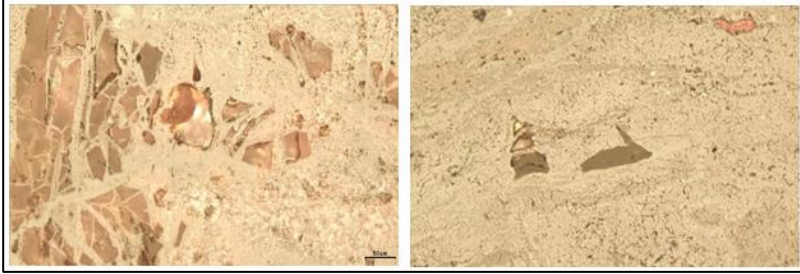
الطبقة المعدنية:

إن وصف الطبقة المعدنية -عندما لا تزال موجودة في العينة- ضروري لفهم آليات التآكل التي تصيب القطع المعدنية. تشير السلسلة العملية في تصنيع المواد الحديدية القديمة (أنظر التعليق رقم: 1) إلى أن المعدن الذي يتم الحصول عليه بالطرق القديمة يكون غير متجانس للغاية مقارنة بنضيره الحالي، حيث يمكن أن يبقى فيه عدد كبير من الشوائب التي تعود إلى المواد الأولية المصنعة أو تلك التي تنساب إليه أثناء عملية التصنيع مشكلة ما يسمى "بجسيمات المرحلة الثانية". بالنسبة للقطع الأثرية قيد الدراسة فهي لم تُستثنى من هذه الاعتبارات، إذ أحصينا فيها مظاهر عدم تجانس عدة ممثلة في شوائب معظمها من نوع الفاياليت-ووستيت (Fe_2SiO_4) (FAYALITE) $WÜSTITE (FeO)_3$ على شكل بنى شجرية متكونة من حبيبات معظمها بدائية مع وجود دندريدات أولية وثانوية (الصورة 4)، وكذلك سيليكات غير متبلورة (الصورة 5) وحبيبات كوارتز مفككة (الصورة 6)، فضلا عن وجود شوائب التي لا تملك عناصر تمييز من خلال الملاحظة المجهرية انعكاسية الإضاءة يرجح أن تكون ترسبات جيرية (الصورة 2).



الصورة 4: شائبة شجرية من نوع فاياليت-وولستيت (العينة Fe003).

أما من حيث الشكل فقد لاحظنا أن الشوائب ممثلة بشكل أسطالي عموماً ، وهو راجع لآثار الطرق أثناء مرحلة التصنيع (الصورة 6).

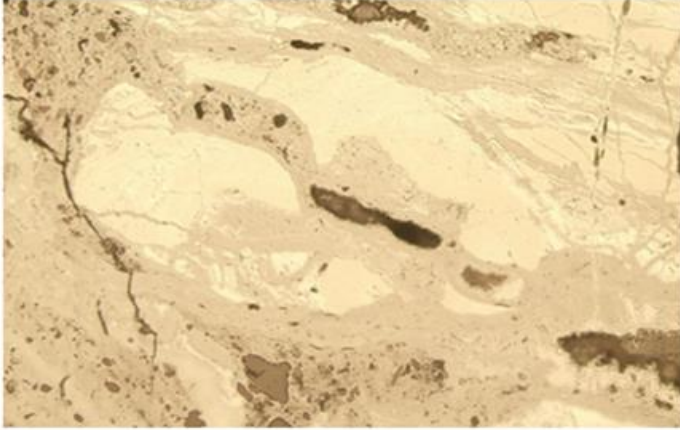


الصورة 5: شوائب سيليكاتية غير متبلورة (العينة Fe006) ومفككة (العينة Fe002) الصورة 6: شوائب كوارتز استطالية

لقد لوحظ في معظم العينات أنه لا توجد أجزاء معدنية متصلة إنما بقايا معدنية فقط تصل أقصى أبعادها 626 ميكرومتر (الصورة 7)، كما أن بعض العينات تحتوي على مناطق معدنية متآكلة تماماً أو على الأقل في أطوار تآكل أولية (الصورة 3). يرجع هذا إلى ثلاثة عوامل أساسية: الأول بلا شك هو العلاقة بين سمك القطع المنخفض مع مدى انحلال المادة المعدنية، حيث أوضحت القياسات المجهرية أن سمك طبقات التآكل جد معتبر إذ تصل إلى حدود 7 مم (الصورة 1 ج) مقابل 10 إلى 15 مم للنواة المعدنية المتآكلة (الصورة 1 أ)، والثاني هو نسبة الشوائب المرتفعة في الهيكل والمسببة لتآكلات موضعية داخل البنية، أما الثالث فهو عامل خارجي (أي عامل الوسط) باعتبار أن الموقع الأثري التي استخرجت منه القطع محاذي للبحر حيث يقع تحت تأثير الكلوريدات (أنظر التعليق رقم: 2) (الصورة 17).

توضح أحجام الحبيبات المتفاوتة ووجود الشوائب الشجرية أن المعدن لم يخضع لمعالجات تجانس وتنقية متقدمة، هذا ما جعل مستوى

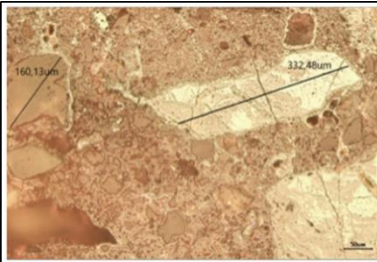
النظافة الاحتوائية (أنظر التعليق رقم: 3) سيئ إلى متوسط. هذه التغيرات الهيكلية يمكن أن تكون عوامل مهمة في الانتشار الموضعي للتآكل.



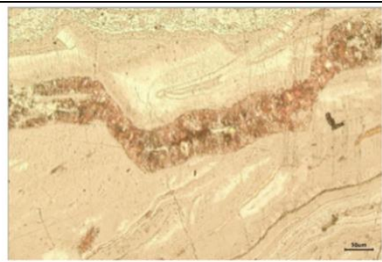
الصورة 7: مواقع معدنية محاطة بأطوار تآكل أولية (العينات Fe001 و Fe005)

مظاهر التآكل:

التآكل الموضعي: لوحظ هذا الأخير في مجمل العينات بصفة متفاوتة، سببه الرئيسي وجود شوائب في السطوح البينية معدن/نواتج تآكل (الصورة 8). يوجد هذا النوع من التآكل في جميع القطع المدروسة (الصور 1 ب، 8، 12، 14، 15، 16، 17)، وقد أدى في بعض الحالات إلى عزل جزء من المعدن في طبقة النواتج الكثيفة (الصورة 9).



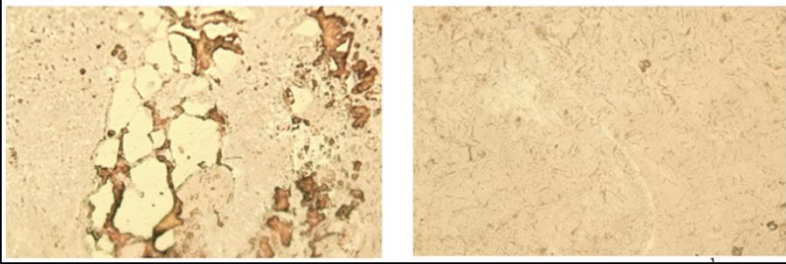
الصورة 9: مواقع معدنية معزولة بين نواتج التآكل (العينة Fe001)



الصورة 8 تآكل موضعي موازي لترسبات لامعدنية (العينة Fe003)

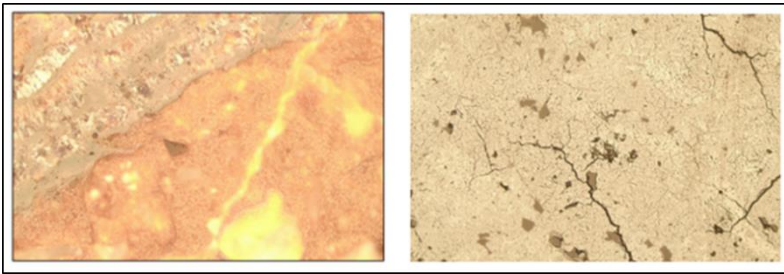
التآكل بين الحبيبي: يظهر تآكل بين الخلايا الحبيبية على أجزاء عدة من العينات خاصة في المناطق الداخلية (الصورة 11) وقد أدى في معظم الحالات إلى اختفاء الحبيبات بالكامل (الصورة 10)، حيث يبدو أن بعض التطورات في منتجات التآكل تم حدوثها باتباع شكل الحبوب كما هو موضح في الصورة المجهرية في الصورة 11 .

تمثل الصورة (الصورة 12) مظهر تآكل مزدوج (موضعي و بين حبيبي) حيث تتقدم منتجات التآكل على طول الشوائب ثم تنتشر على طول حدود الحبوب من حولها.



الصورة 11 حبيبات محاطة
بنواتج تآكل (العينة Fe007)

الصورة 10: تآكل بين حبيبي
في طوره الأول. (العينة Fe005)

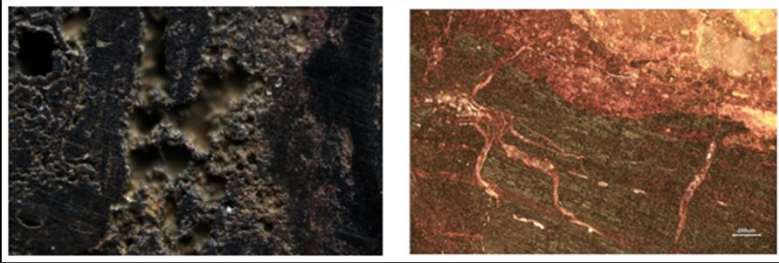


الصورة 12: تآكل مزدوج موضعي-
بين حبيبي (العينة Fe004)

الصورة 13: سطح بيني
مستوي (العينة Fe002)

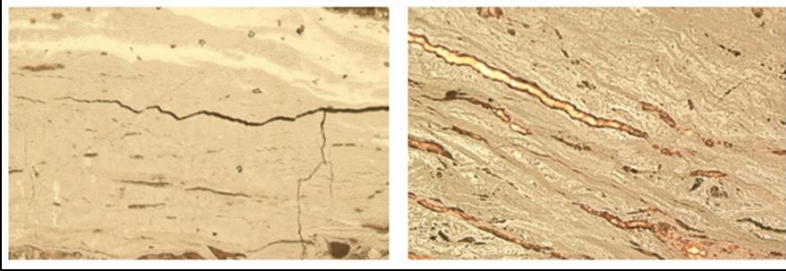
التآكل المنتظم والمعمم: يظهر من خلال الأسطح المستوية للسطوح البينية معدن/طن.ك والسّمك المتجانس لهذه الأخيرة أن التآكل في بدايته كان منتظماً على مجمل القطع (الصور 1 أ، 13)، ولكن بالنظر عدد كبير من الشوائب على مستوى هذه السطوح، أصبح التآكل معمماً بتطور تآكلات موضعية على كامل القطع.

التصدعات والشقوق: فيما يخص الشقوق تم تمييز نوعين منها، شقوق متعامدة مع السطح البيني م/طن.ك وهي تنطلق من الحدود الخارجية للقطع الى غاية النواة المعدنية حيث تحتوي على أطوار كلوريدية مميزة بظهور حبيبات بلون برتقالي محمر وهي الخاصة الأساسية لهذا النوع من التآكل (الصور 14، 15) وشقوق موازية لذات السطح ممتدة على طول ترسبات بيضاء (الصور 16، 17). يصل عرض أكبر الشقوق إلى 60 ميكرون.



الصورة 14: شقوق متعامدة مع السطح البيني م/طن.ك (العينة Fe004) مسببة لتشققات موضعية (العينة Fe007) الصورة 15: أطوار تآكل كلوريدية

يرجع التقدم المحلي أساساً إلى عدم التجانس الهيكلي للمواد. يمكن أن تكون عمليات اختراق منتجات التآكل على طول الشوائب عميقة جداً؛ من ناحية أخرى، يظل التآكل بين الخلايا الحبيبية محصوراً في حواف واجهة المنتجات المعدنية / التآكل.



الصورة 17: شقوق موازية مع السطح
البيني م/طنك (العينة Fe003)

الصورة 16: شقوق موازية مع السطح
البيني م/طنك (العينة Fe007)

خاتمة:

استهدف هذه الورقة الوصف التفصيلي لكل مكون من مكونات نظام التآكل بما يمكن للمجهريّة انعكاسية الإضاءة أن تظهره. فيما يتعلق بالجزء المعدني من العينات؛ كشفت التحاليل أن جل العينات في حالة تآكل جد متقدم وذلك لندرة المواقع التي أظهرت البنية المجهرية للمادة حيث يرجع هذا لعاملين أساسيين: أولاً شدة أكالية الوسط الذي استخرجت منه القطع لا سيما وأن المجهرية أثبتت وجود الأطوار الكلوريدية المتبلورة المعروفة بإحداث التآكل الدوري النشط، وثانياً عدم التجانس المعتبر الذي أحصيناه في العينات وذلك لوجود عدد كبير من شوائب التصنيع ما أثر بشكل أساسي على تنوع مظاهر التآكل .

تظهر منتجات التآكل في شكل نتوءات موضعية من ناحية، وطبقات منتظمة من نواتج تآكل من ناحية أخرى حيث تم تحديد سببين أساسيين للتآكل الموضعي والمتعلقين بالبنية: الأول هو التآكل الحبيبي الذي يبدو أنه ناتج عن ترسبات تصنيع عند حدود الحبوب وهي حبيبات الكوارتز المتبلورة، والثاني وجود شوائب يعود أصلها إلى

المواد الأولية المصنّعة منها كالسيليس الناتج من الفاياليت الذي لم تسمح تقنيات التنقية من انتزاعه، فعندما يطال التآكل المعمم هذه الشوائب يعمل فرق المقاومة الميكانيكية بين المادتين بإحداث شقوق معتبرة تسمح بانسياب الأكسجين والكلور وعناصر أخرى إلى داخل المعدن مسببة تآكلات إضافية.

إن وجهات النظر التي يمكن أن تعطى لهذه الدراسة جد متعددة لعل أولها تلك المتعلقة بالانتقال الأيوني من الوسط للمعدن والدور الذي يلعبه الكلور الذي تم تحديده على مستوى التشققات، إذ أن له تأثيرا كبيرا للغاية في انزياح التوازن الكيميائي عند استخراج القطع الأثرية من الأتربة إلى الهواء، ففي سياق ترميم وصيانة القطع الأثرية الحديدية سيكون من المهم دراسة آليات استئناف التآكل التي يسببها هذا العنصر بجدية. ثانيا أن التآكل المتقدم في النواة المعدنية يجعل من الصعب دراسة تقنيات تصنيع القطع دون اللجوء إلى وسائل تحليل متقدمة كانعكاسية وفلورية الأشعة السينية وكذلك التحليل عن طريق قياس الطيف الكتلي المقترن بالبلازما الحثية لتحديد العناصر ذات الأثر والتي ستكون محور دراسات لاحقة.

التعليقات:

- 1- لمزيد من التفصيل، يمكن للقارئ الرجوع إلى الأعمال التالية: (TYLECOTE, R.F. 1976)، (PLEINER, R. 1967, 1989)، (SMITH, C. S. 1965).
- 2- يمكن للقارئ الرجوع إلى الأعمال التالية: (REGHER S. and all. 2005) و (SELWYN L. C. and all, 2001).
- 3- يقصد بالنظافة الاحتوائية نسب الشوائب الدخيلة على البنية المعدنية والتي تحدد في الحديد المعاصر وفق معايير دقيقة (NORME NF A 04-106) وبما أن المواد الأثرية تحتوي دائماً على عدد كبير من الشوائب، فإن تحديد مستوى

النظافة هنا أمر نسبي، يتم تعريفه فقط من حيث النظافة الشاملة الجيدة أو المتوسطة أو السيئة.

قائمة المصادر والمراجع:

- 1- BERTHOLON Régis et RELIER Caroline. (1990). *Les métaux archéologiques*. Dans BERDUCCOU Marie-Claude, *La conservation en archéologie*. Paris : Masson.
- 2- DORBANE Mustapha. (2016). "Recherche archéologiques sur le site des trois ilots « El Hamdania » commune de Cherrhell ". *Revue d'études archéologiques*. 14. 1. pp. 35-43.
- 3- JAUBERT Leonel. (2004). *Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables : utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques*. Thèse universitaire pour l'obtention de grade de Docteur en Génie des matériaux. Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon. Paris.
- 4- LEVEAU Phillip. (1984). " *Caesarea de Maurétanie, Une ville romaine et ses campagnes* ". *Publications de l'École Française de Rome*. p.p 248-253.
- 5- NEFF Delphine and all. (2006). "Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: Estimation of the average corrosion rates involving analytical techniques and thermodynamic calculations". *Corrosion Science*. 48. pp. 2947–2970.
- 6- UHLIG Hebert Henry. (1970). *Corrosion et protection*. Paris: Dunod.

