

Les Altérations Causées par le Sel sur Certains Matériaux Archéologiques : Approche Expérimentale

Rabhi Merouane

*Maître de conférences
Institut d'Archéologie
Université Alger 2.*

Bellahreche Hocine

*Maître Assistant
Département d'Histoire & d'Archéologie
Université de Sétif 2.*

Résumé

La conservation des objets archéologiques constitue un axe important de recherche, son rôle fondamental est d'assurer la pérennité des artefacts qui ont été exposés aux agents d'altérations durant les processus d'enfouissement. Lors de leur extraction du sol et au contact de l'air, un ensemble d'interactions physico-chimiques accélèrent le processus de dégradation. L'effet du sel comme agent dégradant les matériaux archéologiques n'a pas suscité l'intérêt des chercheurs, nous tenterons d'apporter une contribution à cet égard.

Cette approche expérimentale tente en premier lieu de reconnaître, de comprendre et de définir les dégradations causées par le sel et qui sont difficilement détectables. Cet agent soluble pénètre dans les structures poreuses des matériaux et fini par se cristalliser causant des dommages irréversibles. Contrôler ou éliminer un taux de sel élevé dans un matériau reste un débat d'actualité dans le milieu des conservateurs. Nous avons essayé d'appréhender ce problème en expérimentant trois différents matériaux archéologiques en répliquant les processus d'absorption et d'élimination du sel.

Mots Clés : *Matériaux archéologiques; Expérimentation ; Conservation; Absorption du sel ; Désalinisation ; Conductance.*

1- Introduction

Les matériaux archéologiques subissent différents types d'altérations causées essentiellement par des agents naturels. Certains de ces agents sont facilement déterminables sur le terrain, l'œil averti d'un archéologue peut décrire quelques agents de post-déposition. Par contre, beaucoup de facteurs physico-chimiques sont difficilement reconnaissables et requièrent soit des études analytiques ou certaines techniques expérimentales, l'effet du sel sur certains matériaux archéologiques en fait partie¹.

Il est difficile d'isoler l'altération due uniquement au sel sans avoir recours à l'expérimentation. Certains matériaux archéologiques comme la céramique, la pierre et

¹ **Borrelli, E. (1999).** Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials: Salts. *ARC Laboratory Handbook, Volume 3/99.* ICCROM, Rome, P.3.

l'os comportent une porosité qui est perméable aux sels solubles dont les origines peuvent être diverses et complexes, les plus reconnaissables sont l'eau de mer ou les sédiments dont la composition chimique contient des molécules de sel².

Après la campagne de fouille, les objets de différents matériaux ainsi mis au jour sont exposés à l'atmosphère, phénomène qui va permettre la cristallisation du sel. En effet, des cristaux de sel se forment au contact de l'air et vont augmenter de volume petit à petit, engendrant l'altération partielle ou totale des artefacts. Ces altérations sont en fait sous forme de desquamations, effritements des surfaces ou fissurations des structures des objets, leurs conséquences sont irréversibles. Il en est de même pour n'importe quelle investigation scientifique dont l'artefact fera l'objet, si on prend comme exemple l'os, la perte de sa surface implique la perte de la totalité de l'information scientifique à savoir la détermination des traces de coupures d'outils lithiques (cut marks), les traces de dents (tooth marks), ou l'identification anatomique de l'individu^{3 4}.

Les conservateurs qui ont étudié ce problème, divisent le sel qui se prolifère dans la structure des objets en deux catégories⁵ :

- Le sel soluble dont la composition entraîne sa dissolution se transforme en moisissures au contact de l'air. Ce dernier pénètre à travers les pores des objets et finit par se cristalliser causant des dommages irréversibles. Pour les objets dont la porosité est très réduite, le sel s'incruste en surface sous forme de taches blanchâtres, la pression qu'il exerce va détériorer la surface de l'objet⁶.
- Quant aux sels insolubles, ils sont considérés moins dangereux, mais il est nécessaire de les éliminer afin de pouvoir procéder à l'étude de ces objets⁷.

Deux questions primordiales nécessitent des réponses: peut-on désaliniser un objet archéologique? Doit-on procéder à cette désalinisation?

Cette étude tentera de répondre à ces interrogations à partir d'un essai expérimental effectué sur trois matériaux archéologiques. L'approche se basera sur deux facteurs, d'abord l'absorption du sel par l'objet, ensuite son élimination.

² **Johnson, J. (1998).** Soluble Salts and Deterioration of Archeological Materials. *Conserve Gram* 6/5, P.1.

³ **Keeley, L.H. (1980).** *Experimental Determination of Stone Tool Uses: A Microwear Analysis*. University of Chicago Press, Chicago.

⁴ **Jones, P.R. (1980).** Experimental Butchery with Modern Stone Tools and its Relevance for Paleolithic Archaeology. *World Archaeology* 12, 153-165.

⁵ **Johnson, J. (1998).** *Opcit*, P.2.

⁶ **Borrelli, E. (1999).** *Opcit*, P.3.

⁷ **Arnold, A. and Zehnder, K. (1991).** Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts. In CATHER, S. [ed.], *"The Conservation of Wall Paintings". Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute*, London, 13-16 July 1987. Marina del Rey (California), Getty Conservation Institute: 103-135.

Cette expérimentation vise à démontrer l'importance de cette procédure dans le but d'améliorer la conservation des objets archéologiques issus des fouilles. L'objectif est à la fois de contrôler et de mesurer la conductance (*) et la teneur en sel dans certains matériaux archéologiques, mais aussi de connaître leurs taux de perméabilité et leurs capacités d'absorption, des observations seront faites afin de noter les altérations remarquables visuellement après l'exposition de ces matériaux dans des milieux salés.

Comme étape finale de cette expérimentation, un protocole de désalinisation sera appliqué, une solution neutre d'eau déminéralisée utilisée dans ce travail pour le rinçage des matériaux, les résultats de cette procédure seront mis en évidence.

Afin de concrétiser les buts de cette étude expérimentale sur un plan comparatif et corrélatif, une partie analytique a été rajoutée, la démarche consiste à contrôler la conductance dans deux pièces archéologiques provenant d'un site d'âge médiéval, la première en céramique la seconde en os.

2- Matériel et méthode

Les matériaux les plus fréquemment découverts dans les sites archéologiques ont été choisis pour réaliser cette expérimentation. Il s'agit notamment de l'os, de la céramique et de la pierre, ces matériaux sont sélectionnés comme suit :

- Cinq fragments d'os de petite taille.
- Cinq tessons de céramique commune et sans émaille.
- Cinq fragments de galets en calcaires.

Les objets archéologiques choisis pour la corrélation sont les suivants :

- Un fragment de céramique archéologique d'époque médiévale.
- Un os archéologique d'âge médiéval.

L'étude expérimentale nécessite un matériel de laboratoire que nous présentons comme suit :

- Appareil photo numérique.
- Gobelets pour servir de récipients pour chaque objet.
- Balance électronique.
- Conductimètre.
- Centrifugeuse.
- Bocal de mesure des volumes liquides.
- Une quantité suffisante de sel (NaCl).
- 10 litres d'eau du robinet.
- 10 litres d'eau déminéralisée.
- 5 litres d'eau de mer.

(*) Soumis à une différence de potentiel, les corps et les solutions laissent passer une certaine quantité de courant, la **conductance** est la représentation de cette capacité. La conductance est proportionnelle à la salinité, elle est mesurée en Siemens (S), quant à la salinité on la mesure en milligramme par litre (mg/l).

- 5 kg d'un mélange constitué de limon et de sable de plage.
- Une solution de H₂O₂ (peroxyde d'hydrogène).
- Gants de laboratoire pour éviter d'éventuelles contaminations du matériel à analyser.

2-1- La phase expérimentale

La première étape consistait à décrire et à prendre en photos l'ensemble des échantillons à étudier dans leurs états initiaux. Un ensemble d'enregistrements a été nécessaire dont le poids, les mesures, ainsi que les teneurs en sel avant expérimentation. Un numéro d'inventaire a été attribué à chaque échantillon selon la différence de matériau, et ce de la façon suivante : La lettre C pour la céramique, P pour la pierre et O pour l'os. Des chiffres sont utilisés pour différencier les solutions utilisées dans cette expérimentation :

- l'échantillon 1 de chaque matériau sera mis dans un gobelet rempli d'une proportion mesurée d'eau déminéralisée.
- l'échantillon 2 de chaque matériau sera mis dans un gobelet rempli d'une quantité mesurée d'eau de mer.
- l'échantillon 3 de chaque matériau sera mis dans un gobelet rempli d'une quantité mesurée de sel.
- l'échantillon 4 de chaque matériau sera mis dans un gobelet rempli d'une quantité mesurée de sédiment.
- l'échantillon 5 de chaque matériau sera mis dans une quantité mesurée d'eau du robinet.

Le temps d'exposition de ces matériaux sera le même pour toutes les solutions, à savoir 30 jours. Dans une deuxième phase, une opération de désalinisation graduelle sera appliquée et durant laquelle les objets seront extraits de leurs solutions, pour commencer une opération de rinçage à l'eau déminéralisée. Un temps de mesure de la teneur en sel dans cette eau sera aussi déterminé, soit de 7 heures pour la première désalinisation, 24 heures pour la seconde et pour finir 24 heures supplémentaires. La mesure de la teneur en sel sera bien entendu faite à l'aide d'un conductimètre.

Comme dernière étape et après désalinisation, les objets subiront un examen sur leur état de conservation général, un diagnostic visuel sera fait pour les matériaux afin de voir l'évolution d'éventuelles dégradations.

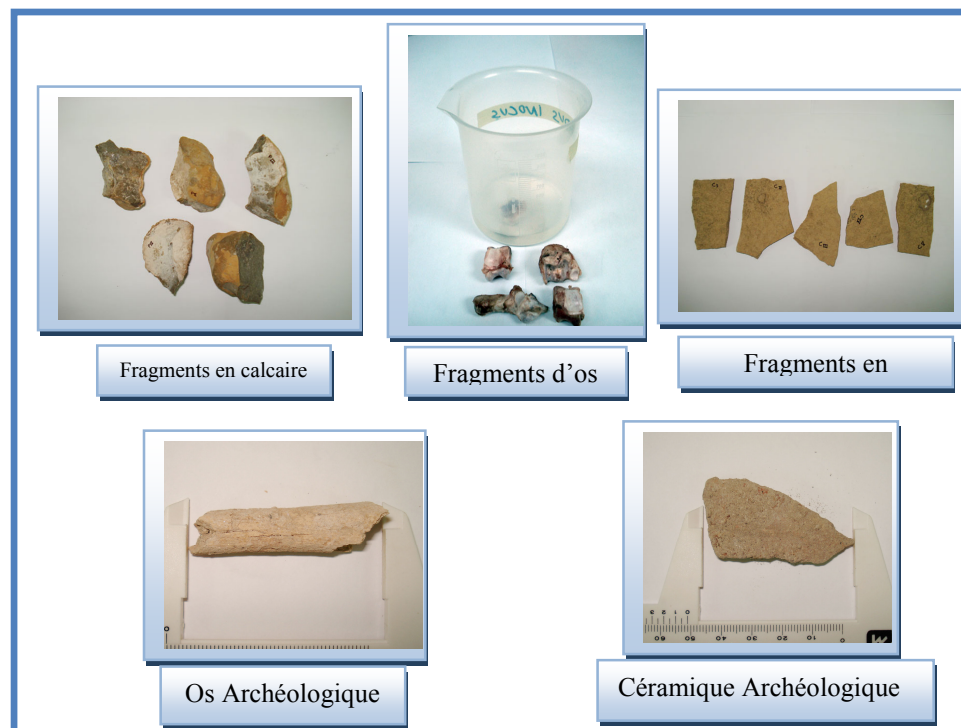


Figure 1 : Les objets utilisés dans l'étude Expérimentale



Figure 2: Traitement de l'os au H₂O₂ avant l'expérimentation



Figure3 :Mesure des conductances à l'aide d'un conductimètre

3- Enregistrement des données et Résultats

Concernant les ossements, et après les avoir décortiqués de la viande, il a été nécessaire d'utiliser le peroxyde d'hydrogène avec une teneur de 33% w/v afin d'éliminer la matière organique et de minéraliser l'os, cette opération a été répétée quatre fois à deux heures d'intervalles dans une centrifugeuse. La quantité de H₂O₂ est équivalente à 200ml, et à la fin de chaque phase la solution usée est vidée et remplacée.

Un sédiment fin a été mélangé à une petite quantité de sable, représentant une pesée de 200g, cette même pesée a été faite pour le sel. Les solutions d'eau du robinet, d'eau déminéralisée et d'eau de mer ont été mesurées et représentent 150ml chacune. La conductance et la teneur en sel ont été mesurées pour chaque solution avant l'expérimentation. L'eau déminéralisée et l'eau du robinet ont enregistré des taux de sel successifs de 6,99mg/l et 410mg/l, quant à de l'eau de mer la conductance a atteint simultanément 30 et 48 μ S (micro Siemens).

Les échantillons de chaque matériau furent plongés dans la solution indiquée selon l'ordre d'inventaire expliqué précédemment. Les échantillons archéologiques ont été mis dans une solution d'eau déminéralisée afin de mesurer leur conductance, et pouvoir corréler concrètement l'efficacité de ce protocole et voir ses conséquences par rapport à l'état de conservation des objets archéologiques.

Tous les poids et les mesures relatifs au matériel ont été enregistrés et sont présentés dans les tableaux suivants :

	Poids/g	Long/mm	Larg/mm	Epais/mm	Densité
C1	28,05	61	37	6	1,40
C2	36,89	70	49	6	3,68
C3	27,11	75	43	6	2,71
C4	22,40	47	43	6	2,24
C5	27,94	62	34	6	2,79

Tableau1 : Données initiales des fragments en céramique

	Poids/g	Long/mm	Larg/mm	Epais/mm	Densité
P1	77,13	58	41	37	1,92
P2	83,14	66	42	29	2,77
P3	98,40	73	39	31	2,46
P4	66,21	58	40	27	1,10
P5	132,80	59	56	45	2,21

Tableau2 : Données initiales des fragments en calcaire

	Poids/g	Long/mm	Larg/mm	Epais/mm	Densité
O1	15,13	39	23	21	1,51
O2	16,48	65	29	26	0,82
O3	20,60	40	40	27	1,03
O4	13,33	30	25	25	1,33
O5	13,48	35	24	23	0,67

Tableau3 : Données initiales des fragments d'os

	Poids/g	Long/mm	Larg/mm	Epais/mm	Densité
OAr	16,07	50	24	5	3,21
CAr	13,04	45	15	12	2,60

Tableau4 : Données initiales des pièces archéologiques

3-1- Phase d'exposition

Les échantillons de chaque matériau ont été immergés dans les solutions salées un mois durant, pendant cette période aucune manipulation ni mesures n'ont été faites. Durant cette phase, des précautions ont été prises pour éviter les contaminations, à savoir :

1. Les changements de récipients après chaque utilisation.
2. L'utilisation d'un récipient d'eau déminéralisée pour le rinçage systématique du conductimètre après chaque prise de mesure.
3. Aucun contact manuel direct avec les objets n'a été fait.

Les risques d'erreurs ont aussi été pris en considération afin d'être enregistrés notamment:

1. L'évaporation des liquides qui n'a pas été prise en considération.
2. Echecs dans la prise de mesure de l'eau de mer.
3. Changement de taux de sel dans l'eau déminéralisée qui s'est avéré négligeable.

Tous les récipients ont été vidés de leurs solutions, les échantillons de chaque matériau ont été soigneusement observés et aucune trace d'altération n'a été remarquée, à l'exception de l'os exposé dans du sel qui présente des dépôts de sel sur sa surface. Un pesage des échantillons a été fait afin de noter la différence de poids après exposition des échantillons, les résultats obtenus nous ont permis d'établir des graphes relatifs à chaque matériau.

L'os et la céramique archéologiques soumis à la désalinisation ont eux aussi montré une différence de poids conséquente d'environ 0,30 gr pour l'os et 0,13 gr pour la céramique. Les graphes montrent une certaine différence du poids des matériaux qui a augmenté significativement pour l'os (Fig.4c), relativement pour la céramique (Fig.4a), néanmoins aucun changement de poids n'a été enregistré pour le calcaire (Fig.4b). Cela montre que la porosité de l'os et de la céramique permettent une absorption supérieure à celle que permet la porosité du calcaire. La mesure de la conductance après un mois d'exposition nous a permis d'établir les graphes (Fig.5a ;5b ;5c).

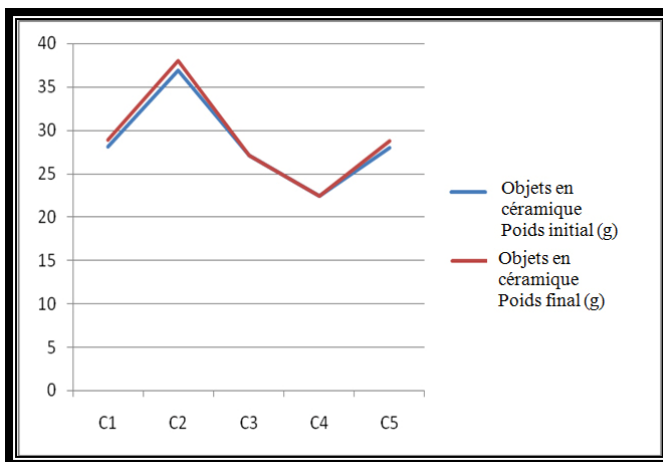


Figure (4-a) : Différence de poids après un mois d'exposition

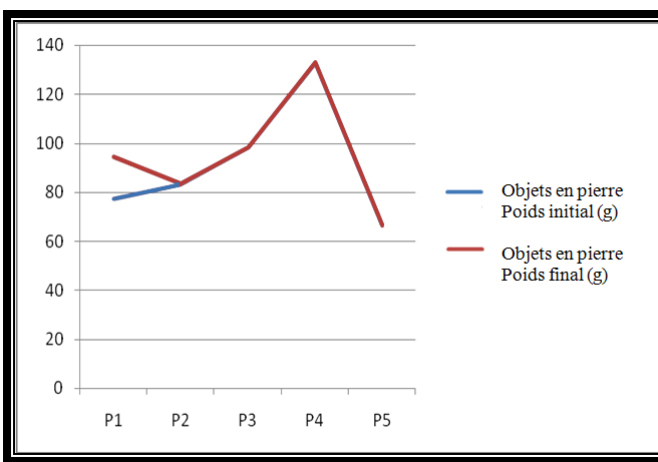


Figure (4-b) : Différence de poids après un mois d'exposition

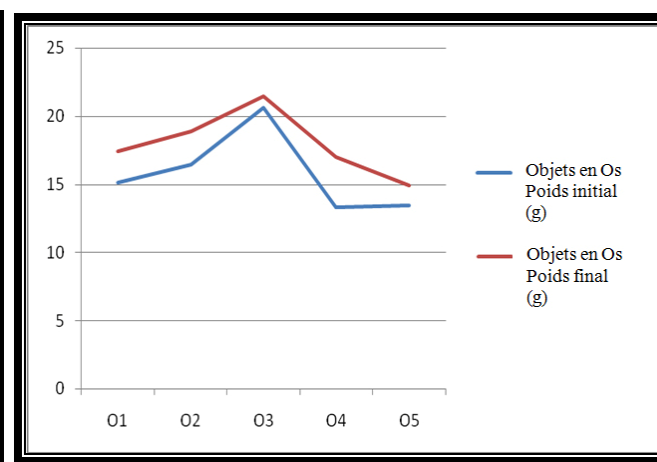


Figure (4-c) : Différence de poids après un mois d'exposition

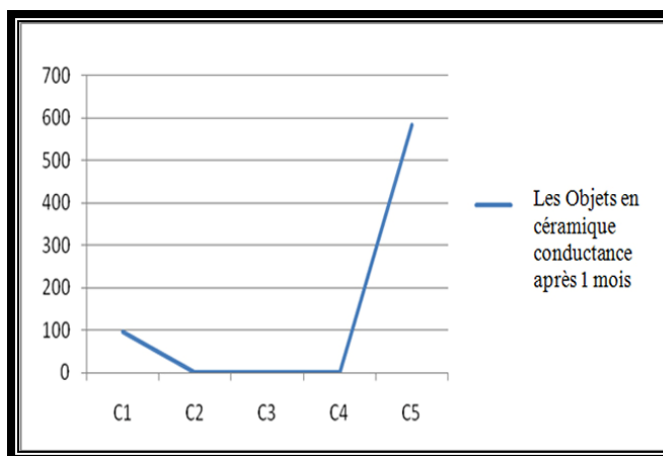


Figure (5-a) : Mesures de la conductance après un mois d'exposition

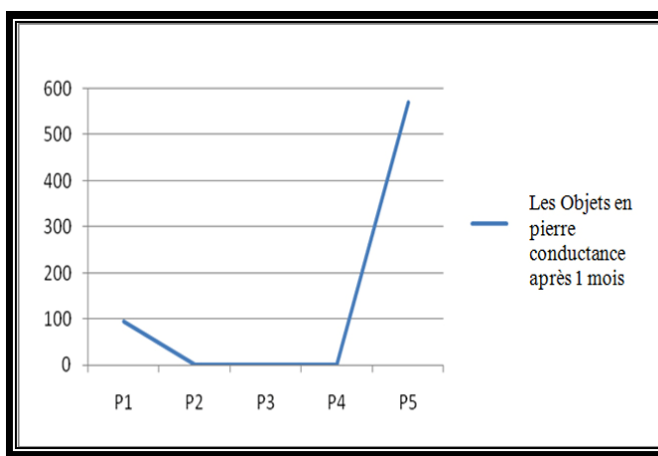


Figure (5-b) : Mesures en conductance après un mois d'exposition

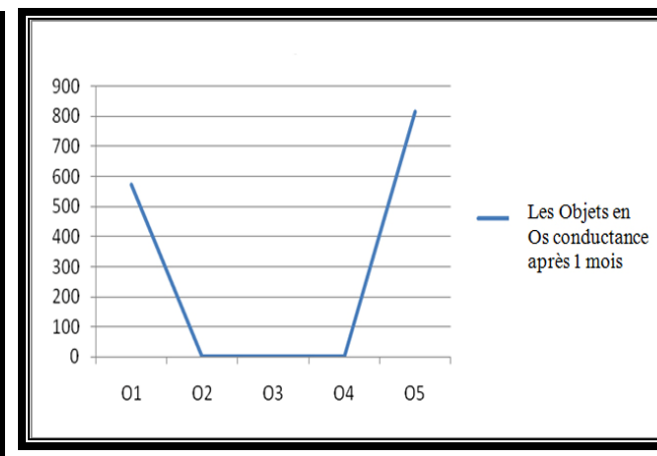


Figure (5-c) : Mesures en conductance après un mois d'exposition

3-2- Phase de désalinisation :

L'opération de désalinisation des matériaux consistait à mettre chaque objet dans un gobelet contenant une quantité mesurée à 150ml d'eau déminéralisée, exposé pour une durée de 7 heures. Les objets ont été retirés afin de renouveler les solutions d'eau déminéralisée, ainsi une deuxième opération d'une durée d'exposition de 24 heures a été entamée, suivie d'une troisième durée de 24 heures. A chaque désalinisation les précautions de contamination ont été prises.

La conductance a été mesurée au début et la fin de chaque opération de désalinisation, les résultats obtenus ont permis d'établir les figures (6, 7 et 8).

La céramique archéologique a donné après 7 heures d'exposition une concentration de sel équivalente à **11,74 mg/l**, quant à l'os archéologique le taux de concentration était de **16,40mg/l**.

Les figures (Fig.9 a, b et c) montrent que le sel contenu dans les matériaux est dégagé graduellement dans l'eau déminéralisée, la quantité de sel dégagée est proportionnelle au degré de salinité de la solution dans laquelle était exposé l'échantillon, les extremums des courbes indiquent les solutions d'eau de mer et de sel.

La céramique archéologique a donné après 24 heures d'exposition une concentration de sel de **15,65 mg/l**, quant à l'os archéologique le taux de concentration était de **62,09mg/l**.

Après la troisième phase d'exposition d'une durée de 24h, le sel continu à être dégagé avec presque la même intensité, néanmoins les mesures de la conductance initiale sont presque nulles (Voir Fig.8).

La céramique archéologique a donné après la troisième phase d'une durée de 24h d'exposition une concentration de sel équivalente à **11,66 mg/l**, quant à l'os archéologique le taux de concentration était de **23mg/l**.

Les figures (Fig.6 ; Fig.7 et Fig.8) démontrent que l'intensité de l'élimination du sel va dans un ordre régressif, la conductance initiale est quasi nulle.

La superposition des graphes des trois phases illustrant les conductances montre une régression continue des taux de sel, ce qui nous permet de dire que les phases de désalinisation ont réussi, les sels sont dégagés des structures des matériaux proportionnellement à la perméabilité de leurs pores (Fig.9a, b et c).

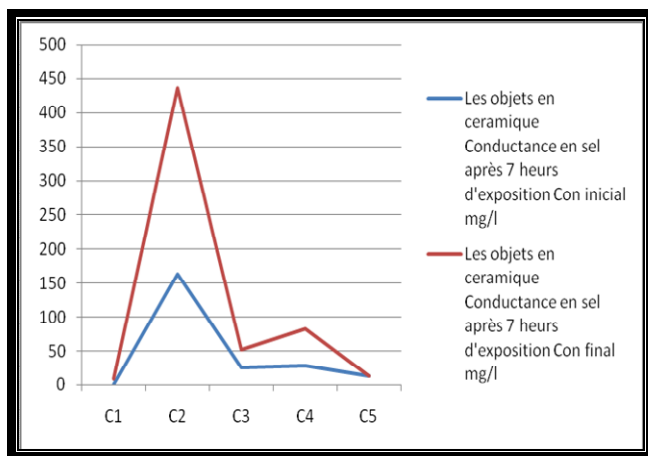


Figure (6-a) : Désalinisation après 7 heures d'exposition (Objets en céramique)

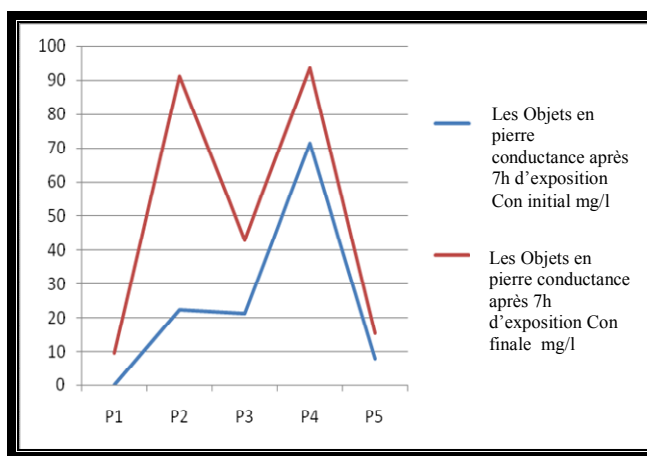


Figure (6-b) : Désalinisation après 7 heures d'exposition (Objets en pierre)

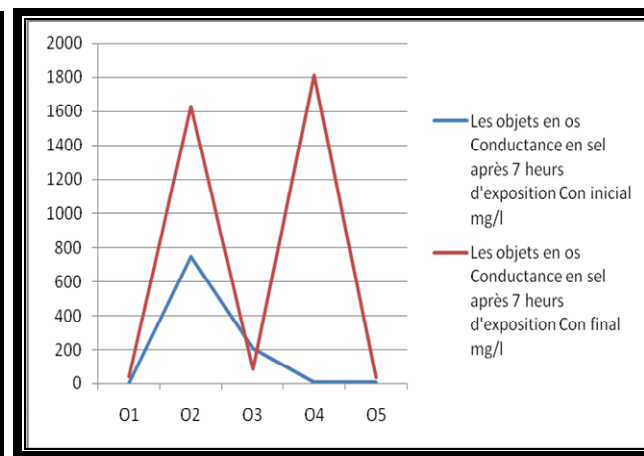


Figure (6-b) : Désalinisation après 7 heures d'exposition (Objets en Os)

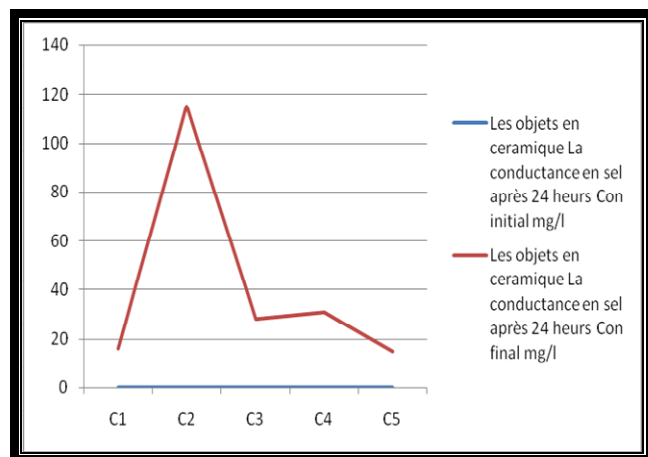


Figure (7-a) : Désalinisation après 24 heures d'exposition (Objets en céramique)

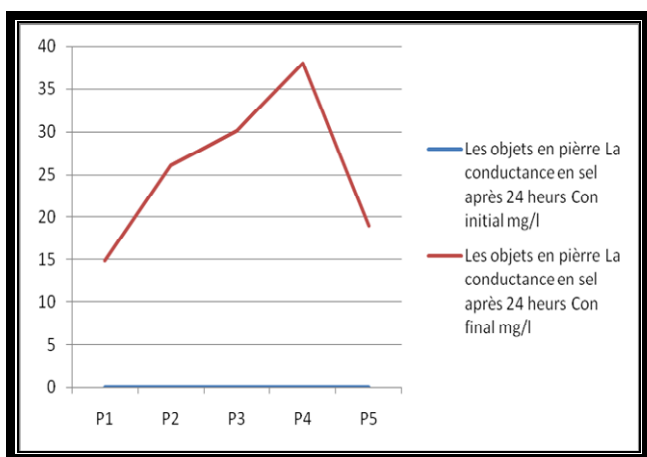


Figure (7-b) : Désalinisation après 24 heures d'exposition (Objets en pierre)

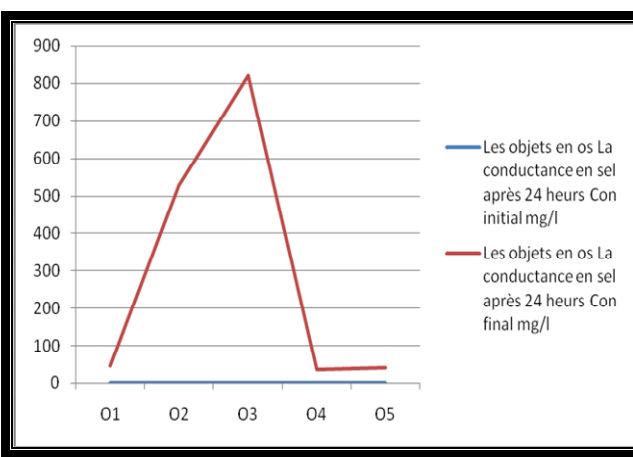


Figure (7-c) : Désalinisation après 24 heures d'exposition (Objets en Os)

4- Discussion

Cette étude expérimentale a permis de relever un ensemble d'observations qui ont mis en évidence l'impact du sel sur les matériaux testés. En effet, les objets ont augmenté de poids après un mois d'exposition (Fig.4), cela démontre que les matériaux ont absorbé les sels dissous dans les différentes solutions utilisées. De plus, l'enregistrement des extremums croissants indique une augmentation continue du taux de sel après un mois d'exposition (Fig.5). A la phase de désalinisation, l'ensemble des enregistrements démontrent une désalinisation différentielle et continue des matériaux étudiés (Fig.6) (Fig.7) et (Fig.8), cette donnée est confirmée lors des corrélations des graphes (Fig.9), le sel est éliminé graduellement après chaque exposition dans de l'eau déminéralisée, la même observation a été notée pour les deux objets archéologiques utilisés.

L'absorption du sel par certains matériaux archéologiques est démontrée dans cette étude expérimentale. Les structures poreuses des matériaux tels que le calcaire, la céramique et l'os permettent l'incrustation du sel soluble, comme il a été signalé précédemment. Une fois à l'intérieur, le sel se cristallise au contact des agents atmosphériques causant des dommages irréversibles à ces structures. Cette simple expérimentation ne peut démontrer que toutes les fissurations, desquamations et effritements retrouvés sur les objets au cours et après les fouilles sont dus à cet agent, néanmoins elle confirme que le sel agit activement en combinaison avec d'autres facteurs de dégradations.

Outre l'absorption du sel testée dans cette étude, l'opération de désalinisation s'est elle avérée positive et concluante, sans pour autant affirmer que cette méthode pourrait être efficace à long terme, et applicable pour toute sorte d'objets archéologiques.

Cette expérimentation a été menée dans un milieu de laboratoire restreint à des conditions environnementales contrôlées. Les échantillons choisis sont actuels et les objets archéologiques sont en bon état de conservation, la question reste posée pour les objets archéologiques complètement détériorés.

Malgré que le sel soit un agent de détérioration actif, faut-il désaliniser? Pouvons-nous contrôler cette opération ? Jusqu'à quel point faut-il le faire ? Ces questions nécessitent des investigations plus poussées dans ce domaine.

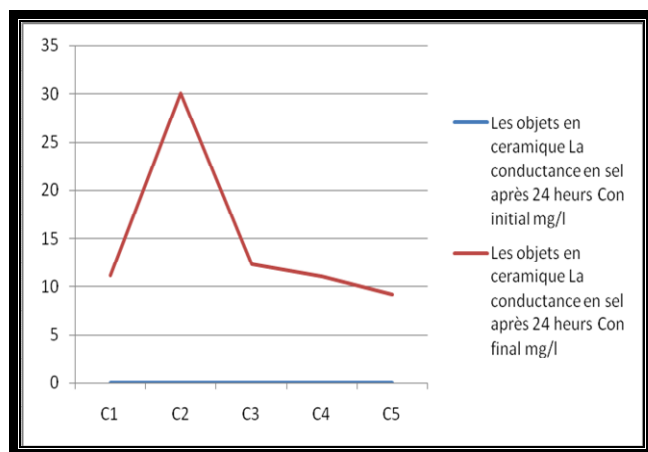


Figure (8-a) : Désalinisation des objets en céramique après 24 heures d'exposition

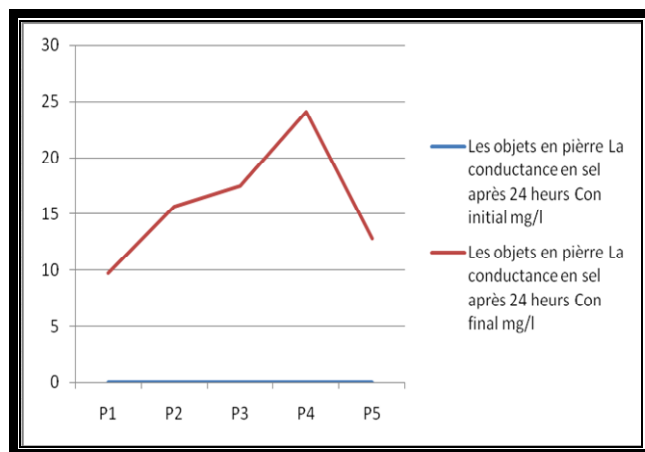


Figure (8-b) : Désalinisation des objets en pierre après 24 heures d'exposition

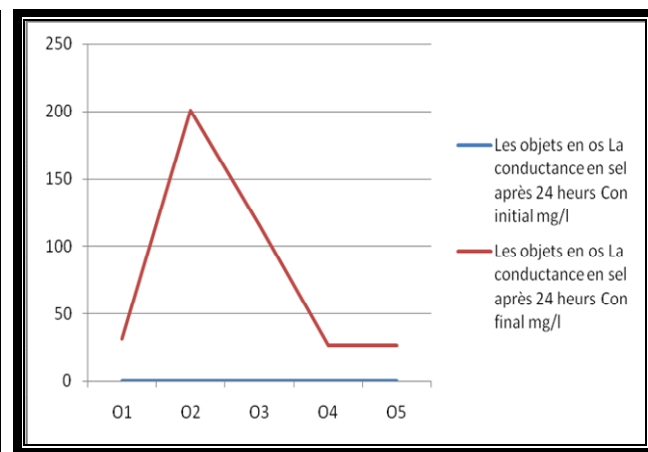


Figure (8-c) : Désalinisation des objets en Os après 24 heures d'exposition

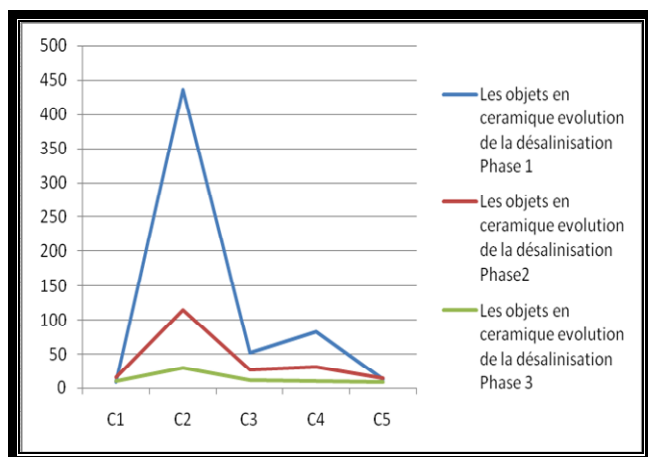


Figure (9-a) : Graphe de corrélation de la conductance durant la période de désalinisation (objets en céramique)

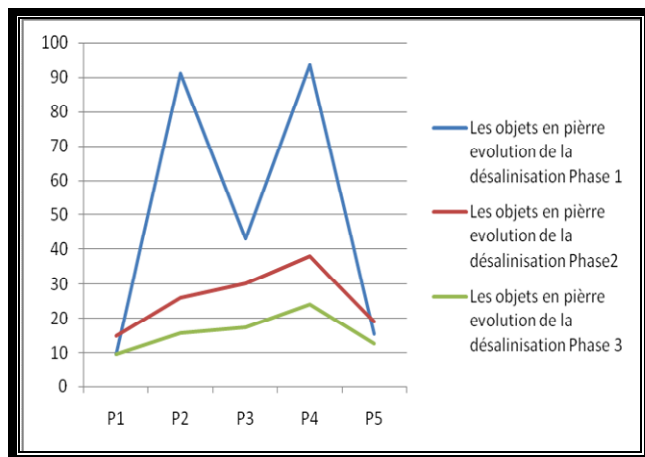


Figure (9-b) : Graphe de corrélation de la conductance durant la période de désalinisation (objets en pierre)

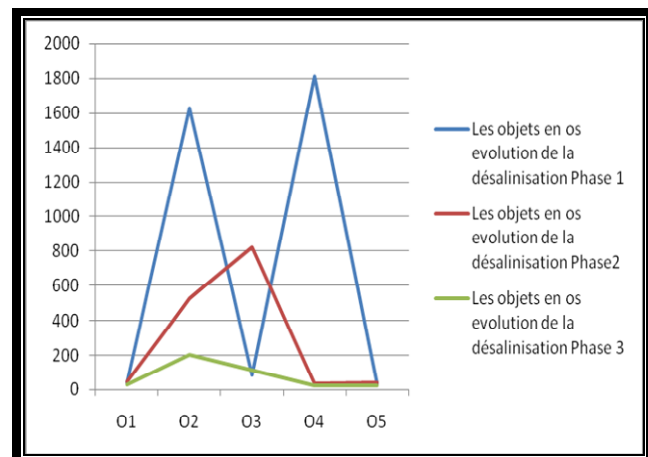


Figure (9-c) : Graphe de corrélation de la conductance durant la période de désalinisation (objets en Os)