

Analyse spectroradiométrique de quelques perles néolithiques roumaines

Michel ERRERA

1. Problématique

L'objet de cet article est de déterminer la composition de sept petites perles mises au jour sur le tell chalcolithique de Taraschina. Les matériaux qui composent ces pièces de très petite dimension n'ayant pu être déterminés de manière macro et microscopique, les perles ont été analysées par nos soins par spectroradiométrie. Elles ont été comparées avec des référentiels établis dans le cadre des projets JADE 1 et JADE 2 "Interprétations sociales des objets-signes en jades alpins dans l'Europe néolithique" (ANR-12-BSH3-0005-01). Deux des sept perles du site de Taraschina ont été retrouvées à l'intérieur de carottes tubées dont le prélèvement a été effectué hors de l'emprise de la zone 2. Cinq autres perles sont issues des ensembles 2, 5 et 7 de la zone 2, attribués à la culture Gumelnița : deux proviennent de la fosse FS 2054, une autre de la fosse F2010 - Us 2009 (datée de 4323-4052 BC) et les deux dernières des Us 2014 et 2045. Une meilleure connaissance des éléments recueillis devrait permettre, nous l'espérons, de mieux appréhender les mécanismes sociaux qui ont existé au Néolithique.

2. Méthode d'analyse

La principale difficulté liée à l'étude d'objets de Musées ou de collection est le recours à des méthodes d'analyses absolument non destructives. La plupart des méthodes habituelles nécessitent des prélèvements de quelques dizaines de μ^3 pour l'ICP-MS par exemple, à quelques cm^3 pour les lames minces étudiées au microscope polarisant. Lorsqu'il s'agit de déterminer pétrographiquement une roche ayant servi à fabriquer un objet archéologique, cette dernière méthode est cependant indispensable à un stade ou à un autre. Les autres méthodes d'analyses (analyses chimiques,

diffraction RX ...) ne peuvent, dans la plupart des cas, n'apporter qu'un complément d'information en précisant l'une ou l'autre phase minérale.

3. Spectroradiométrie

L'analyse spectroradiométrique en réflectance diffuse est une technique utilisée par les télédéTECTEURS qu'ils soient astronomes, physiciens, géologues ou militaires. Elle est souvent méconnue des analystes qui lui préfèrent des méthodes plus traditionnelles parce que quantitatives mais avec les limites qui ont été évoquées plus haut. Cette technique mesure le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par toute matière, qu'elle soit cristallisée ou amorphe, liquide ou gazeuse. Elle présente l'avantage, en plus de son caractère non destructif, d'être d'un très faible coût, rapide et mobile, ce qui est un atout considérable en muséologie. De plus, le spectroradiomètre peut être pointé dans n'importe quelle direction, ce qui veut dire qu'il peut aussi bien être monté sur un échafaudage que dans une lunette télescopique, dans un avion ou dans un satellite. Le petit robot (Mars Express) qui a sillonné Mars et à qui l'on doit la démonstration de la présence d'eau sur cette planète dans le passé est en fait un spectroradiomètre mobile (Bibring *et al.*, 2006). Les remarquables analyses des échantillons prélevés sur l'astéroïde Itokawa sont un autre exemple frappant de l'utilisation de la spectroradiométrie (Tsuchiyama, 2014). En archéologie, cette méthode peut être utilisée aussi bien sur un chantier de fouilles que pour les collections des Musées. Toutefois, cette technique n'est souvent qu'un médiocre moyen de détermination par elle-même, d'autres techniques étant plus efficaces, bien que destructives. En revanche c'est une insurpassable méthode de comparaison, si l'on dispose d'un référentiel adéquat, puisqu'elle prend en compte un très

grand nombre de paramètres (effet dit « de matrice ») comme la couleur, la composition chimique, la taille des grains, leur surface, le remplissage des espaces intergranulaires, etc.

Elle a été utilisée avec succès d'abord par Brian Curtiss (1993), indépendamment par Errera (1995), puis, plus récemment, par Morin et d'autres (Morin, 2012). On trouvera un aperçu méthodologique et une bibliographie complète dans JADE (Errera *et al.*, 2012 et Errera, 2017) ainsi que la définition des principaux termes utilisés (*endmember*, spectrofaciès, ...).

3.1. Appareillage

Le spectroradiomètre utilisé est un spectroradiomètre à haute résolution dont les caractéristiques complètes sont reprises en annexe. Il appartient à la MSHE Ledoux USR 3124 (Franche-Comté Conseil Régional) de Besançon qui l'a mis à notre disposition dans le cadre du projet ANR JADE 2 dont il a été question plus haut.

Sa couverture spectrale nominale va de 342,7 à 2501,7 nm, soit de 0,3427 à 2,5017 μ . Dans le cas des présentes mesures, il a été couplé à une fibre optique dont l'angle optique est de 25° et les mesures ont toutes été réalisées en « close-up » c'est-à-dire à une distance de quelques mm de la cible, de manière qu'elle soit éclairée avec une très forte intensité mais sans toutefois qu'elle ne soit affectée par des ombres portées. La référence en spectralon® et le fond noir sur lequel étaient directement posées les perles ont été mesurées à 2 cm de distance environ. Dans ces conditions, le champ de mesure est de 8 mm x 16 mm, soit une surface de près de 1,28 cm². La profondeur de mesure, fortement dépendante de la longueur d'onde (les ondes sont plus pénétrantes dans l'infrarouge) et de la transparence de la cible, est de plusieurs dizaines de μ à quelques mm. La mesure est donc réalisée sur un volume de matière et non seulement sur une aire déterminée.

3.2. Analyse et corpus

Les analyses conduites sur les sept perles provenant du site chalcolithique de Taraschina ont été réalisées à la Cité de la Préhistoire d'Ornac-l'Aven, dans une chambre noire souvent utilisée à cet effet. Un seul spectre a été réalisé sur chaque pièce posée directement sur un fond noir (noir sur pratiquement toute la gamme des longueurs d'onde). Il faut noter la difficulté des mesures en raison de la petitesse et de la légèreté des pièces. Les perles n'ont pu être fixées sur le fond noir, un souffle suffisait à les déplacer. Les

spectres portent les références selon les indications des minigraps : FS_2054_baguette, FS_2054 rond, Log_27, Log_29, US_2009, US_2014 et US_2045. À noter aussi les spectres nécessaires pour les calibrations indispensables : Ref_Ref_001 (la référence en « Spectralon® » mesurée par rapport à elle-même ; la réflectance doit donc être de 100 % pour une calibration idéale), Fond_001 et Fond_002 (le fond noir, mesuré respectivement en début d'analyse puis en fin d'analyse ; la réflectance devrait être nulle dans un cas idéal ; elle est, dans le cas présent inférieure à 3,5 %). Il n'en sera plus question dans la suite, la réflectance du fond noir étant largement inférieure à celle de la cible, c'est-à-dire qu'elle n'influence que très peu la réflectance des cibles dans les conditions de mesure, d'autant plus que la plus grande partie du champ est occupé par la pièce analysée.

3.2.1. La perle en serpentinite

La perle Log_29 a été déterminée, sans réserve, comme réalisée à partir d'une serpentinite, roche dont le minéral dominant est ici l'antigorite. Cette détermination est fondée sur la proximité des comparaisons avec, notamment, USGS Antigorite.spc [0,455 ; oui (mais)], une antigorite caractéristique (groupe des serpentines), ainsi que sur de nombreuses autres serpentinites déterminées comme telles.

Quelques spectres (tabl. 2) du référentiel Bulgarie_2009.sli (858 canaux * 210 spectres) indiquent une correspondance intéressante avec la perle étudiée ici (Pétrequin *et al.*, 2012), mais aucun spectre du référentiel Roumanie.sli (971 canaux, 21 spectres ; 2013) ne montre de correspondance remarquable, ce qui veut simplement dire qu'aucune lame de hache en serpentinite n'a été analysée (biais à l'échantillonnage, seules les lames reconnues comme alpines ayant fait l'objet de cette étude particulière ; Pétrequin *et al.*, 2017).

3.2.2. Les perles en céramique

Les perles FS_2054_baguette, FS_2054 rond, Log_27, US_2009, US_2014 et US_2045 ont été déterminées comme étant en céramiques, de nature légèrement différente (type 1 et type 2). Une réserve cependant, ces déterminations ne sont fondées, en l'absence d'un référentiel adéquat, que sur l'expérience de l'analyste (ME) et des comparaisons pertinentes avec des spectres de vernis du désert, de quartz et de micas blancs. Il serait donc utile d'analyser aussi des tessons de céramique associés aux différentes perles. Cette procédure permettrait de voir si les perles sont de même nature et, le cas échéant, d'en estimer l'âge si les tessons peuvent être datés.

Il semble que les principales différences entre les céramiques de type 1 et celles de type 2 résultent d'un état différent de l'oxydation du fer (Fe^{2+} : 634 nm ; Fe^{3+} : 372, 413, 502 nm), ce qui pourrait s'interpréter par des températures de cuisson un peu différentes (Shoval, 1993), mais la littérature ne semble guère abondante à ce sujet. Ceci ne peut être confirmé en l'absence d'un référentiel adéquat.

La céramique du type 2b semble légèrement s'écarter des autres (type 1 et type 2a) par la présence d'un minéral du groupe des épidotes qui se marque surtout par une absorption de faible ampleur vers 1552 nm.

Les autres absorptions sont liées à la présence de liaisons Mg–OH et surtout Fe–OH (entre 1410 et 1414 nm), H–OH en inclusion aqueuse (argiles = entre

1904 et 1907 nm ; quartz = entre 1981 et 1997 nm) et Al–OH (mica blanc = entre 2200 et 2210 nm).

Dès lors, on peut avancer, avec beaucoup de prudence, que l'argile à base des céramiques proviendrait de l'altération de roches proches des granites, le minéral du groupe des épidotes (allanite ?) provenant de la saussuritisation de celles-ci.

3.3. Analyses complémentaires

Dans le paragraphe précédent, il avait été proposé de réaliser quelques analyses complémentaires sur des tessons de céramique associés aux différentes perles. Quelques mesures ont donc été réalisées, dans les mêmes conditions que précédemment, sur trois

Spectres	Principales caractéristiques	Détermination proposée
FS_2054_baguette	634 (0,67) , 1410 (0,92) , 1837 (0,98), 1869 (0,99), 1907 (0,63) , 1981 (0,99), 2208 (0,90) , 2353 (0,96) nm	Céramique type 1
FS_2054_rond	370 (0,96), 408 (0,91) , 500 (0,98), 1410 (0,98), 1791 (0,98), 1869 (0,99), 1907 (0,80) , 1986 (0,98), 2208 (0,96), 2311 (0,98) nm	Céramique type 2a
Log_27	721 (0,75) , 1410 (0,98), 1833 (0,97), 1872 (0,98), 1907 (0,79) , 1989 (0,99), 2200 (0,95) , 2351 (0,99) nm	Céramique type 1
Log_29	483 (0,87) , 463 (0,96), 497 (0,99), 555 max , 707 (0,91) , 902 (0,91) , 1160 (0,81) , 1285 (0,98), 1363 (0,98), 1396 (0,62) , 1833 (0,97), 1872 (0,96), 1907 (0,72) , 1978 (0,71) , 2106 (0,84) , 2137 (0,96), 2260 , 2272 (0,79) , 2322 (0,39) , 2423 (0,85) nm	Serpentinite (antigorite dominante)
US_2009	372 (0,95) , 413 (0,81) , 502 (0,98), 936 (0,98), 1114 (0,99), 1410 (0,98), 1552 (0,99), 1826 (0,97), 1872 (0,98), 1904 (0,79) , 1989 (0,97), 2205 (0,96), 2250 (0,98), 2339 (0,98) nm	Céramique type 2b
US_2014	373 (0,94) , 411 (0,83) , 502 (0,97), 930 (0,99), 1414 (0,97), 1837 (0,98), 1872 (0,98), 1904 (0,88) , 1981 (0,99), 2210 (0,96), 2311 (0,98) nm	Céramique type 2a
US_2045	659 (0,72) , 1407 (0,98), 1833 (0,97), 1872 (0,98), 1904 (0,85) , 1997 (0,98), 2210 (0,96), 2346 (0,98) nm	Céramique type 1

Tableau 1

Principales caractéristiques relevées après développement du continuum et déterminations proposées. En gras, les absorptions importantes, en italique (US_2009 uniquement) celles liés à un minéral du groupe des épidotes.

Références	Score	Comp. visuelle	Spectres	Détermination
Bulg_089	0,708	oui (mais)	VARNA I, tombe 67. Musée régional d'Histoire, Varna, I-3112 (collier)	Serpentinite
Bulg_044	0,446	oui mais	Pic MOURGAS (Bulgarie). Musée national d'Histoire (Sofia), réf. 53176	Serpentinite
Bulg_168	0,316	oui mais	SVOBODA (dépôt). Musée régional d'Archéologie, Plovdiv, hache n° 27. N° JADE 2009_114	Néphrite rétrotransformée (+ clinocllore) : Pétrequin <i>et al.</i> 2017, p. 1275

Tableau 2

Résultat des comparaisons, après développement du continuum entre 500 et 2500 nm, entre le spectre Log_029 et ceux de spectres du référentiel Bulgarie_2009.sii (858 canaux * 210 spectres).

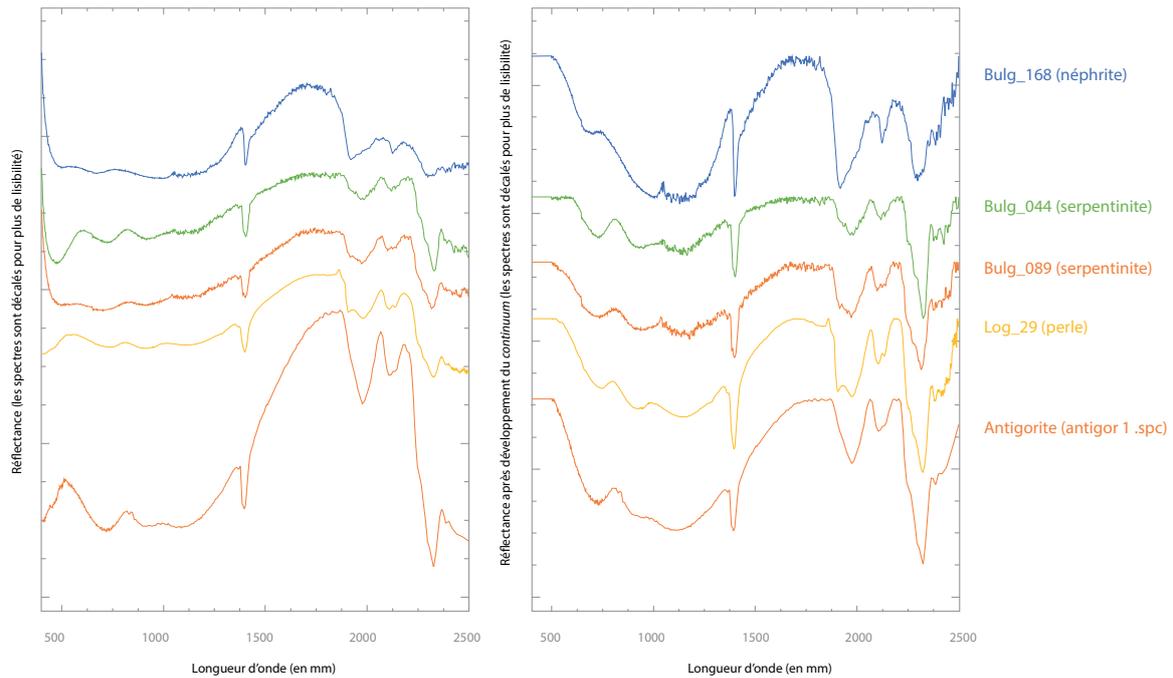


Figure 1

Spectres avant (à gauche) et après (à droite) développement du continuum entre 500 et 2500 nm. Sous le spectre de la perle analysée (Log_29), un spectre de référence à l'antigorite (USGS antigor1.sp). Au-dessus (de bas en haut), les spectres Bulg_089 (serpentine), Bulg_044 (serpentine) et Bulg_168 (néphrite).

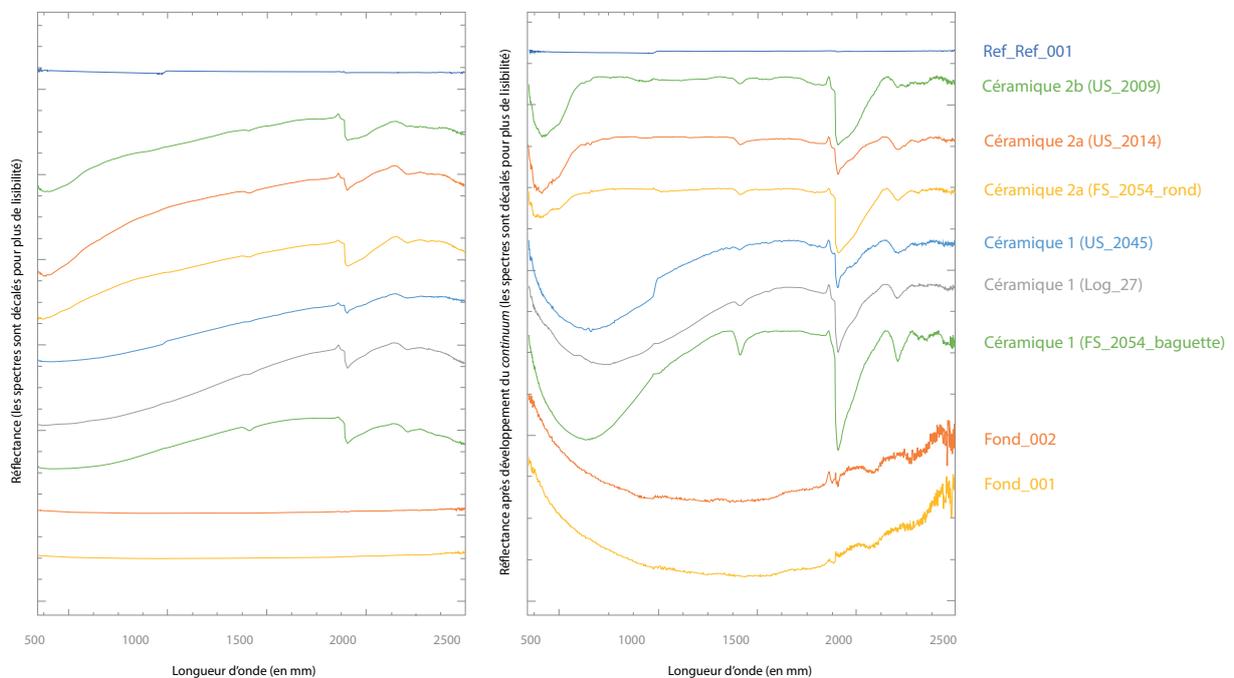


Figure 2

Les spectres des perles en céramique selon leur typologie : type 1 (FS_2054_baguette, Log_27, US_2045), type 2a (FS_2054_rond, US_2014) et type 2b (US_2009). Les spectres du fond noir (Fond_001 avant la première mesure, Fond_002 après la dernière mesure) et celui de la référence nécessitée par la calibration.

tessons sélectionnés par R. Furestier. Pour éviter l'influence éventuelle d'une pellicule superficielle, une petite surface de l'épaisseur des tessons a été grattée sur quelques mm² (mesures_a, *close-up*). Sinon, les mesures ont été réalisées sur la tranche (mesures_b, *close-up*) ou, lorsque cela était possible, sur la surface extérieure apparaissant comme lissée (mesures_c). Les résultats de ces mesures sont consignés dans le tableau 3. Les spectres obtenus sont repris dans la figure 3.

On peut remarquer que l'ensemble des spectres est assez homogène avec, entre leur début (342,7 nm) et 1300 nm, des absorptions électroniques dues principalement à Fe³⁺, vers 1400 nm des absorptions dues principalement à des liaisons vibrationnelles Fe–OH, vers 1900 nm des absorptions vibrationnelles dues à des liaisons H–OH (quartz, argiles), vers 2200 nm dues à des liaisons vibrationnelles Al–OH (micas blancs) et entre 2225 nm et leur fin (2501,7 nm) des liaisons vibrationnelles Fe ou Mg–OH ou à leurs combinaisons (amphiboles, chlorites, épidotes, phlogopite).

Parmi les meilleures comparaisons avec les banques de données spectrales (USGS), il faut citer le quartz (quartz4.spc=0,897), la montmorillonite (montmor4.spec=0,884), les kaosmectites (kaosmec5.spc

= 0,884), la rectorite (rector1.spc = 0,881), la marialite (marial.spc=0,874) etc. c'est-à-dire des minéraux ubiquites (quartz), des minéraux des argiles ou apparentés (montmorillonite, kaosmectites, rectorite) ou encore des minéraux d'altération des produits des projections volcaniques (marialite).

Les meilleures comparaisons entre les perles et les tessons de céramique pris comme références sont consignées dans le tableau 4.

On doit constater, de toute évidence, que seuls les spectres déterminés comme étant des céramiques des types 2a et 2b montrent des comparaisons positives alors que tous les spectres des céramiques du type 1 ne montrent aucune comparaison.

La situation est cependant différente si le développement du continuum n'est réalisé que sur une partie des spectres, entre 1300 et 2500 nm, où les éventuelles absorptions dues à Fe³⁺ sont pratiquement absentes (tab. 5 et fig. 4).

Il est donc très clair que les différences constatées sont presque exclusivement dues aux différents états de Fe mais que la matière elle-même des perles (en retirant bien évidemment la perle en serpentinite) comme des tessons est quasiment identique.

Références	Mesures	Principales caractéristiques
Tara_HS1_a	close-up sur partie grattée	407 (0,94), 488 (0,99), 515 (0,99), 1075 (0,99), 1168 (0,99), 1262 (0,99), 1351 (0,99), 1414 (0,98), 1556 (0,99), 1773 (0,99), 1909 (0,88) , 1973 (0,99), 2087 (0,99), 2198 (0,97), 2311 (0,99), 2464 (0,98)
Tara_HS1_b	close-up sur tranche	385 (0,89), 408 (0,96), 487 (0,99), 1052 (0,99), 1168 (0,99), 1262 (0,99), 1414 (0,98), 1552 (0,99), 1770 (0,99), 1909 (0,86) , 1970 (0,99), 2087 (0,99), 2100(0,99), 2210 (0,96), 2311 (0,98), 2467 (0,97)
Tara_HS1_c	sur partie lissée	431 (0,83), 497 (0,94), 1187 (0,99), 1414 (0,96), 1773 (0,99), 1833 (0,99), 1909 (0,83) , 1973 (0,99), 2205 (0,95) , 2325 (0,98), 2461 (0,97)
Tara_HS2_a	close-up sur partie grattée	376 (0,93), 487 (0,99), 1149 (0,99), 1281 (0,99), 1909 (0,91) , 2087 (0,99), 2213 (0,97), 2313 (0,97), 2488 (0,95)
Tara_HS2_b	sur partie brute	434 (0,77), 506 (0,94), 1013 (0,99), 1168 (0,99), 1414 (0,95) , 1476 (0,99), 1556 (0,99), 1763 (0,99), 1909 (0,80) , 1970 (0,99), 2087 (0,99), 2205 (0,97) , 2289 (0,98), 2313 (0,94) , 2388 (0,98), 2481 (0,96)
Tara_HS3_a	close-up sur partie grattée	350 (0,94), 369 (0,95), 408 (0,98), 433 (0,97), 512 (0,94), 1017 (0,99), 1168 (0,99), 1285 (0,99), 1418 (0,96) , 1773 (0,99), 1909 (0,81) , 1970 (0,99), 2087 (0,99), 2200 (0,96) , 2250 (0,99), 2308 (0,99), 2468 (0,96)
Tara_HS3_b	sur partie brute	353 (0,94), 369 (0,96), 384 (0,98), 407 (0,98), 431 (0,99), 508 (0,99), 652 (0,99), 1017 (0,99), 1160 (0,99), 1414 (0,96) , 1552 (0,99), 1766 (0,99), 1909 (0,89) , 1970 (0,99), 2087 (0,99), 2208 (0,96) , 2250 (0,99), 2311 (0,98), 2461 (0,96)
Tara_HS3_c	sur partie lissée	353 (0,96), 369 (0,94), 407 (0,98), 433 (0,97), 511 (0,95), 646 (0,98), 1017 (0,98), 1164 (0,99), 1277 (0,99), 1351 (0,99), 1414 (0,96) , 1552 (0,99), 1773 (0,99), 1909 (0,80) , 1964 (0,99), 2100 (0,99), 2205 (0,95), 2250 (0,99), 2303 (0,99), 2464 (0,96)

Tableau 3

Principales caractéristiques relevées après développement du continuum et déterminations proposées. En gras, les absorptions importantes, en italique celles liés à un minéral du groupe des épidotes.

La nature des perles est donc bien confirmée. Toutes, à l'exception de celle trouvée en Log_29 qui est en serpentinite, sont constituées de matières de nature argileuse pratiquement identiques. Elles appartiennent

cependant à 2 types bien distincts dont seules celles du type 2 peuvent être rapportées directement aux céramiques (tessons) analysées.

Spectres	Détermination proposée	Références	Score	Comp. visuelle
FS_2054_baguette	Céramique type 1	Aucun	0,000	sans objet
FS_2054_rond	Céramique type 2a	TaraHS3_b	0,814	oui (mais)
Log_27	Céramique type 1	Aucun	0,000	sans objet
US_2009	Céramique type 2b	TaraHS3_c TaraHS3_b	0,832 0,815	oui mais oui mais
US_2014	Céramique type 2a	TaraHS1_b	0,911	oui (mais)
US_2045	Céramique type 1	Aucun	0,000	sans objet

Tableau 4

Comparaisons des spectres, après développement du continuum sur toute leur étendue, réalisés sur les perles avec des tessons sélectionnés (références).

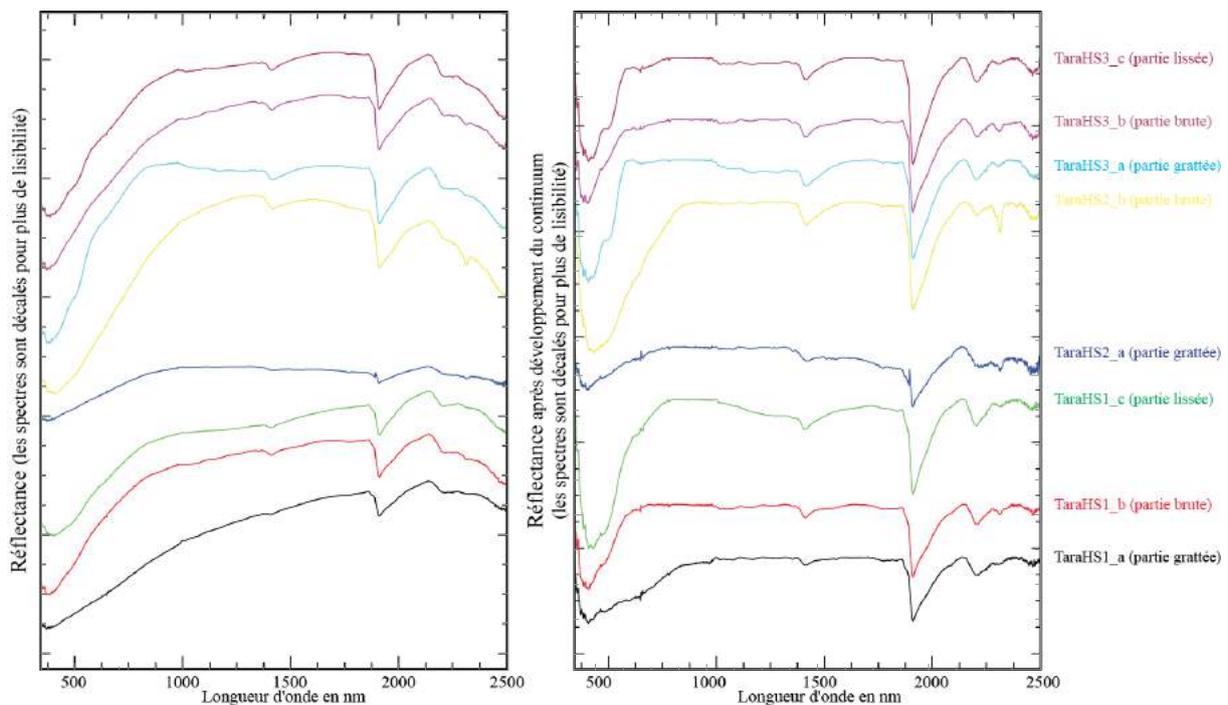


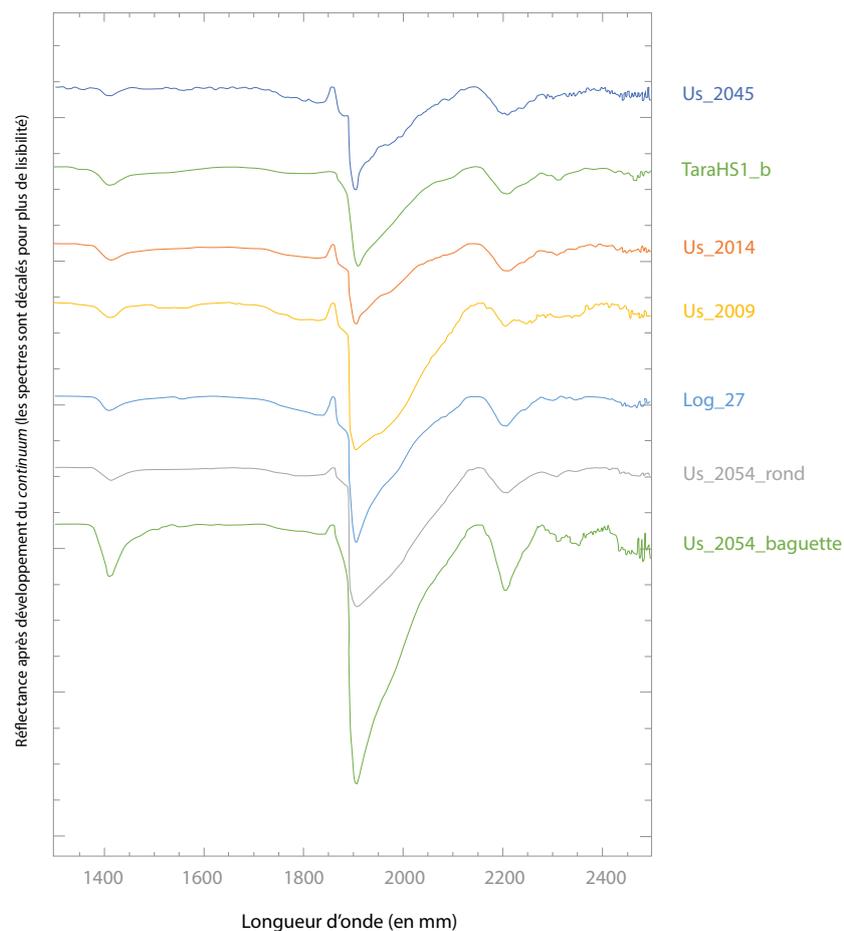
Figure 3

Spectres des tessons avant (à gauche) et après (à droite) développement du continuum sur toute leur étendue.

Spectres	Détermination proposée	Références	Score	Comp. visuelle
FS_2054_baguette	Céramique type 1	TaraHS3_c	0,866	oui (mais)
FS_2054_rond	Céramique type 2a	TaraHS3_a	0,864	oui (mais)
Log_27	Céramique type 1	TaraHS1_b	0,910	oui (mais)
US_2009	Céramique type 2b	TaraHS1_b	0,838	oui mais
US_2014	Céramique type 2a	TaraHS1_b	0,948	oui
US_2045	Céramique type 1	TaraHS1_a	0,932	oui

Tableau 5

Comparaisons des spectres, après développement du continuum entre 1300 et 2500 nm, réalisés sur les perles avec des tessons sélectionnés (références).

**Figure 4**

Spectres après développement du continuum entre 1300 et 2500 nm. Pour marquer la similitude, le spectre d'un tesson (TaraHS1_b) a été ajouté au-dessus de sa plus proche correspondance (US_2014).

Références bibliographiques

- Bibring et al. 2006** : BIBRING (J.-P.), LANGEVIN (Y.), MUSTARD (J.F.), POULET (F.), ARVIDSON (R.), GENDRIN (A.), GONDET (B.), MANGOLD (N.), PINET (P.), FORGET (F.), and the Omega team – Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA Mars Express Data, *Science* 312, p. 400-404
- Carozza, Micu 2017** : CAROZZA (L.), MICU (C.) – *Société et environnement durant le Néolithique et les âges des Métaux dans le delta du Danube (Roumanie)*. *Archéologie du delta du Danube*. Rapport de mission archéologique sous-commission Europe-Maghreb rapport 2016 - troisième année : 179 p. (voir aussi <http://archeologie-danube.hypotheses.org/a-propos>)
- Clark et al. 1993** : CLARK (R.N.), SWAYZE (G.A.), GALLAGHER (A.J.), KING (T.V.V.), CALVIN (W.M.) – The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library : Version 1 : 0.2 to 3.0 microns, in U.S. *Geological Survey Open File Report* 93-592, 1340 p.
- Curtiss 1993** : CURTISS (B.) – Visible and Near-Infrared Spectroscopy for Jade Artifact Analysis, in F. Lange (ed.), *Precolumbian Jade, New Geological and Cultural Interpretations*. Salt Lake City, University of Utah Press, p. 73-81.
- Errera 1995** : ERRERA (M.) – *Application de la spectroradiométrie à l'identification de pierres précieuses*, Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique, Département de Géologie et de Minéralogie, Rapport Annuel 1993-1994, p. 109-128.
- Errera et al. 2012** : ERRERA (M.), PÉTREQUIN (P.), PÉTREQUIN (A.-M.) – Spectroradiométrie, référentiel naturel et étude de la diffusion des haches alpines, in P. Pétrequin, S. Cassen, M. Errera, L. Klassen, A. Sheridan et A.M. Pétrequin (eds.), *Jade. Grandes haches alpines du Néolithique européen. V^e et IV^e millénaires av. J.-C.*, Cahiers de la MSHE C.N. Ledoux, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain, tome 1, p. 440-533.
- Errera 2017** : ERRERA (M.) – Le spectroradiomètre de Spectra Vista Corporation (SVC) : nouvelles perspectives d'application, in P. Pétrequin, E. Gauthier et A.M. Pétrequin (eds.), *Jade. Objets-signes et interprétations sociales des jades alpins dans l'Europe néolithique*. Les Cahiers de la MSHE Ledoux, 17, Dynamiques territoriales, 9, Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté et Centre de recherche archéologique de la vallée de l'Ain, tome 3, p. 69-74.
- Morin 2012** : MORIN (J.) – *The political economy of stone celt exchange in pre-contact British Columbia the Salish nephrite/jade industry*. PhD thesis (Anthropology), The University of British Columbia (Vancouver) April 2012, 736 p. (<https://circle.ubc.ca/handle/2429/41934>).
- Pétrequin et al. 2012** : PÉTREQUIN (P.), CASSEN (S.), ERRERA (M.), TSONEV (T.), DIMITROV (K.), KLASSEN (L.), MITKOVA (R.) – Les haches en « jades alpins » en Bulgarie, in P. Pétrequin, S. Cassen, M. Errera, L. Klassen, A. Sheridan et A.M. Pétrequin (eds.), *Jade. Grandes haches alpines du Néolithique européen. V^e et IV^e millénaires av. J.-C.* Cahiers de la MSHE C.N. Ledoux, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain, tome 2, p. 1231-1279.
- Pétrequin et al. 2017** : PÉTREQUIN (P.), VOINEA (V.), TSONEV (T.), TURCANU (S.), SERBANESCU (D.), KIOSAK (D.), PERESUNCHAK (O.), POLISCHUK (L.), CHERNAKOV (D.) – Des Alpes à la mer Noire (Bulgarie, Roumanie et Ukraine), in P. Pétrequin, E. Gauthier et A.M. Pétrequin (ed.), *Jade. Objets-signes et interprétations sociales des jades alpins dans l'Europe néolithique*. Les Cahiers de la MSHE Ledoux, 17, Dynamiques territoriales, 9, Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté et Centre de recherche archéologique de la vallée de l'Ain, tome 3, p. 467-489.
- Shoval 1993** : SHOVAL (S.) – *A Method for Estimation of the Firing Temperature of Ancient Pottery by Infrared Spectroscopy*, Israel Geological Society, Annual Meeting, 1993, p. 119.
- Tsuchiyama 2014** : TSUCHIYAMA (A.) – Asteroid Itokawa. A Source of Ordinary Chondrites and à Laboratory for Surface Processes. *Elements*, 10, 1, p. 45-50.
- USGS DIGITAL SPECTRAL LIBRARY 1993** : voir Clark et al. 1993.

Annexe - Caractéristiques techniques du spectroradiomètre utilisé

Spectroradiomètre à haute résolution HR 1024 de SVC (Spectra Vista Corporation, Poughkeepsie, New York)			
1	Nombre de voies simultanées :	aucune	
2	Possibilité de mesures :	SFOV	Cible, Référence
3	Couverture spectrale et échantillonnage : Possibilité de mesure programmable entre 342 et 2501 nm.	350 à 1000 nm 1000 à 1875 nm 1875 à 2500 nm	(~ 1,3 nm) (~ 4,6 nm) (~ 2,5 nm)
4	Détecteurs :	Silicon 512 canaux InGaAs 1 256 canaux InGaAs 2 256 canaux	de 350 à 1000 nm Ide 1000 à 1875 nm de 1875 à 2500 nm
5	Réseaux de diffraction :	3 réseaux de diffraction	
6	Nombre de canaux utilisés après recouvrement :	993	(max. 1024)
7	Recouvrements :	de 960 à 1000 Swir1/Swir2 NIR-SWIR	(17 canaux) Overlap Algorithm (14 canaux)
8	Calibration en longueur d'onde :	feuille de Mylar	
9	Bruits de fond :	inf. à 0,05 % inf. à 0,05 % inf. à 0,05 %	entre 400 et 1000 nm entre 1000 et 1850 nm entre 1850 et 2000 nm
10	Champ de mesure :	env. 43,5 * 65 mm à 30 cm env. 8 * 16 mm à 2 cm	4° FOV Fibre optique 25°
11	Distance à la cible :	33,3 cm environ, 10 cm min 2 cm en routine, close-up possible	4° FOV
12	Temps de mesure : Temps d'intégration	1 à 30 secondes msec	(programmable) (programmable)
13	Mobilité : toutes configurations (laboratoire, intérieur, extérieur, échafaudage etc.)		
14	Poids de la tête :	3,3 kg	
15	Éclairage : 2*250 watts max. par lampe halogène	AC nominal 220 V	t° = 5777 °K
16	Le spectroradiomètre de SVC est la propriété du MSHE Ledoux USR 3124 (Franche-Comté Conseil régional) à F-25000 Besançon		
Logiciels utilisés			
2013 - ce jour :		SVC HR-1024 PC Data Acquisition Software Version 1.13.13	
Caractéristiques des références utilisées			
2013 - ce jour :		Spectralon SRT-99-050, sans correction	