



HAL
open science

Les argiles utilisées au Moyen Âge et à l'époque moderne par l'industrie tuilière de Barbéry (Calvados).

Anne Bocquet-Liénard, Marie-Paule M.-P. Bataillé, Robert Davidson, Juliette Dupré, Mathilde Leclerc, Marc-Antoine Thierry, Xavier Savary, Adrien Dubois, Jean-Baptiste Vincent, Olivier Maquaire, et al.

► To cite this version:

Anne Bocquet-Liénard, Marie-Paule M.-P. Bataillé, Robert Davidson, Juliette Dupré, Mathilde Leclerc, et al.. Les argiles utilisées au Moyen Âge et à l'époque moderne par l'industrie tuilière de Barbéry (Calvados).. Archeosciences, revue d'Archéométrie, 2023, 47, pp.49-77. 10.4000/archeosciences.11589 . hal-04416445

HAL Id: hal-04416445

<https://normandie-univ.hal.science/hal-04416445v1>

Submitted on 30 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Les argiles utilisées au Moyen Âge et à l'époque moderne par l'industrie tuilière de Barbery (Calvados)

Anne Bocquet-Liénard, Marie-Paule Bataillé, Robert Davidson, Juliette Dupré,
Mathilde Leclerc, Marc-Antoine Thierry, Xavier Savary, Adrien Dubois,
Jean-Baptiste Vincent, Olivier Maquaire, Nadia Cantin

DANS **ARCHEOSCIENCES** 2023/1 (N° 47-1), PAGES 49 À 77
ÉDITIONS **PRESSES UNIVERSITAIRES DE RENNES**

ISSN 1960-1360

ISBN 9782753597174

DOI 10.4000/archeosciences.11589

Article disponible en ligne à l'adresse

<https://www.cairn.info/revue-archeosciences-2023-1-page-49.htm>



CAIRN.INFO
MATIÈRES À RÉFLEXION

Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...

Flashez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.



Distribution électronique Cairn.info pour Presses universitaires de Rennes.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.



ArcheoSciences
Revue d'Archéométrie

47-1 | 2023
Varia

Les argiles utilisées au Moyen Âge et à l'époque moderne par l'industrie tuilière de Barbery (Calvados)

The clays used in the Middle Ages and in the Early Modern period by the tile makers of Barbery (Calvados)

Anne Bocquet-Liénard, Marie-Paule Bataillé, Robert Davidson, Juliette Dupré, Mathilde Leclerc, Marc-Antoine Thierry, Xavier Savary, Adrien Dubois, Jean-Baptiste Vincent, Olivier Maquaire et Nadia Cantin



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/archeosciences/11589>

DOI : 10.4000/archeosciences.11589

ISSN : 2104-3728

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 30 décembre 2023

Pagination : 49-78

ISBN : 978-2-7535-9717-4

ISSN : 1960-1360

Distribution électronique Cairn



Référence électronique

Anne Bocquet-Liénard, Marie-Paule Bataillé, Robert Davidson, Juliette Dupré, Mathilde Leclerc, Marc-Antoine Thierry, Xavier Savary, Adrien Dubois, Jean-Baptiste Vincent, Olivier Maquaire et Nadia Cantin, « Les argiles utilisées au Moyen Âge et à l'époque moderne par l'industrie tuilière de Barbery (Calvados) », *ArcheoSciences* [En ligne], 47-1 | 2023, mis en ligne le 01 janvier 2026, consulté le 26 mars 2024. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/11589> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.11589>



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

Les argiles utilisées au Moyen Âge et à l'époque moderne par l'industrie tuilière de Barbery (Calvados)

*The clays used in the Middle Ages and in the Early Modern period
by the tile makers of Barbery (Calvados)*

Anne BOCQUET-LIÉNARD

Auteur correspondant : anne.bocquet-lienard@unicaen.fr
Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Craham, 14000 Caen, France

Marie-Paule BATAILLÉ

Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Craham et Idees-Caen, 14000 Caen, France

Robert DAVIDSON

Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Idees-Caen, 14000 Caen, France

Juliette DUPRÉ

Mathilde LECLERC

Marc-Antoine THIERRY

Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Craham, 14000 Caen, France

Xavier SAVARY

Service archéologie du département du Calvados, 14000 Caen

Adrien DUBOIS

Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Craham, 14000 Caen, France

Jean-Baptiste VINCENT

Archeodunum et Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Craham, 14000 Caen, France

Olivier MAQUAIRE

Normandie Univ, UNICAEN, CNRS, Idees-Caen, 14000 Caen, France

Nadia CANTIN

Archéosciences Bordeaux, UMR 6034 CNRS, Université Bordeaux Montaigne, 33607 Pessac

Résumé : Entre le ^{xiv}^e et le ^{xviii}^e siècle, à Barbery (Calvados), plusieurs tuileries ont produit les matériaux destinés à la couverture d'un grand nombre d'édifices de la plaine de Caen et du Pays de Falaise. La richesse des sources écrites (tabellionage, comptabilités, iconographie) a incité à la mise en place d'un programme de recherche pluridisciplinaire visant à étudier la totalité de la chaîne opératoire depuis l'extraction de la matière première jusqu'à la diffusion des produits finis. Cet article présente le croisement des résultats d'approches géologique, géomécanique, pétrographique et géochimique, croisement qui a permis d'identifier les lieux d'extraction de la matière argileuse, dont ceux indiqués par les sources écrites, de caractériser ses propriétés et de mettre en lumière les choix opérés par les tuiliers pour les terres cuites et la construction des fours.

Keywords: *Between the 14th and 18th centuries, in Barbery (Calvados, France), several tileries produced the materials used to cover a large number of buildings in the Caen plain and the Falaise region. The abundance of written sources (tabellionage, accounts, iconography) prompted the implementation of a multidisciplinary research programme aimed at studying the operating chain from the extraction of the raw material to the distribution of the finished products. This article presents the results of geological, geomechanical, petrographic and geochemical approaches, which have made it possible to identify the sites where the clay material was extracted, to characterise its properties and to shed light on the choices made by the tile makers for the terracotta objects and the construction of the kilns.*

Mots clés : argile, terre cuite, tuileries, géochimie, pétrographie, granulométrie, production, Moyen Âge, époque moderne.

Keywords: *clay, terracotta, tileries, geochemistry, petrology, granulometry, production, Middle Ages, Early Modern period.*

INTRODUCTION

Les études menées sur l'abbaye cistercienne de Barbery¹ ont mis en évidence à travers une riche documentation écrite l'importance de Barbery (Calvados) dans la production d'éléments de couverture entre le ^{xiv}^e et le ^{xviii}^e siècle. Le nombre de mentions de tuileries nous a interrogé sur ce type d'activité, sa chronologie, l'organisation de sa chaîne opératoire et la diffusion de sa production. Ces tuiles sont livrées par exemple dès 1393 au château de Falaise² ; en 1442 au château de Caen³ et en 1486, au château de Thury-Harcourt⁴.

Aujourd'hui à Barbery, à une vingtaine de kilomètres au sud de Caen, le toponyme « la Tuilerie » témoigne encore de l'existence de cette activité, disparue au début du ^{xix}^e siècle. Les Archives départementales du Calvados conservent un plan détaillé de la paroisse de Barbery (1,40 × 1,84 m)⁵ réalisé en 1783, sur lequel figurent trois établissements évoqués, par ailleurs, par Frédéric Vaultier en 1836 (Vaultier, 1836). Ce plan est particulièrement précieux puisqu'il présente, pour chaque tuilerie, cinq éléments que l'on peut interpréter comme un four, deux bâtiments, une halle de séchage et une petite mare dont le trop plein est relié au ruisseau situé dans le fond du vallon (« ruisseau » ou « douet » de Corneville) [figure 1]. Le

parcellaire et le réseau viaire ayant été peu modifiés, il a été possible de géoréférencer ce plan de 1783 et de circonscrire un secteur d'intérêt où les tuileries pouvaient être localisées. Un programme de recherche interdisciplinaire s'est donc mis en place depuis 2016 regroupant historiens, archéologues, archéomètres, géomorphologues ou géophysiciens avec le soutien du ministère de la Culture, du département du Calvados, du CNRS et de l'université de Caen Normandie pour localiser les ateliers et étudier les premières étapes de la chaîne opératoire (Bocquet-Liénard *et al.*, 2017). Les différentes disciplines mobilisées s'intéressent à l'interaction entre l'homme et son milieu (le choix des ressources naturelles et leur utilisation), les moyens de production, l'identification des acteurs économiques et leur place dans l'organisation de la production et de la diffusion. La localisation géographique des ateliers a été abordée grâce à des prospections pédestres et géophysiques et quatre campagnes de fouille ont permis de mettre au jour cinq fours de tuilier (A3, A4, A5, A6 et A10) dans un secteur du vallon où aucun four n'est figuré sur le plan de 1783⁶ (Bocquet-Liénard *et al.*, 2017 ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2018a ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2018b ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2020 ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2021 ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2022) [figure 1]. Cet article est consacré à la caractérisation des matériaux argileux disponibles et à leur utilisation dans les activités liées à l'industrie de la terre cuite architecturale.

1. L'abbaye est fondée en 1181 (Dubois & Vincent, 2015).
2. BNF, fr 26026 n° 1906.
3. Arch. dép. Calvados, F 4096/1, quittance de Roger Vivier, marchand de tuile à Barbery (4 décembre 1442).
4. Arch. dép. Calvados, E453.
5. Arch. dép. Calvados, H 1381/2 en ligne sur le site des Archives départementales du Calvados.

6. Un article sur les structures de cuisson a été soumis à la revue *Archéologie médiévale*. Le four A1, représenté sur le plan de 1783, et bien repéré par la géophysique ainsi qu'une autre anomalie A2, située à proximité, n'ont pas encore fait l'objet d'investigation archéologique.

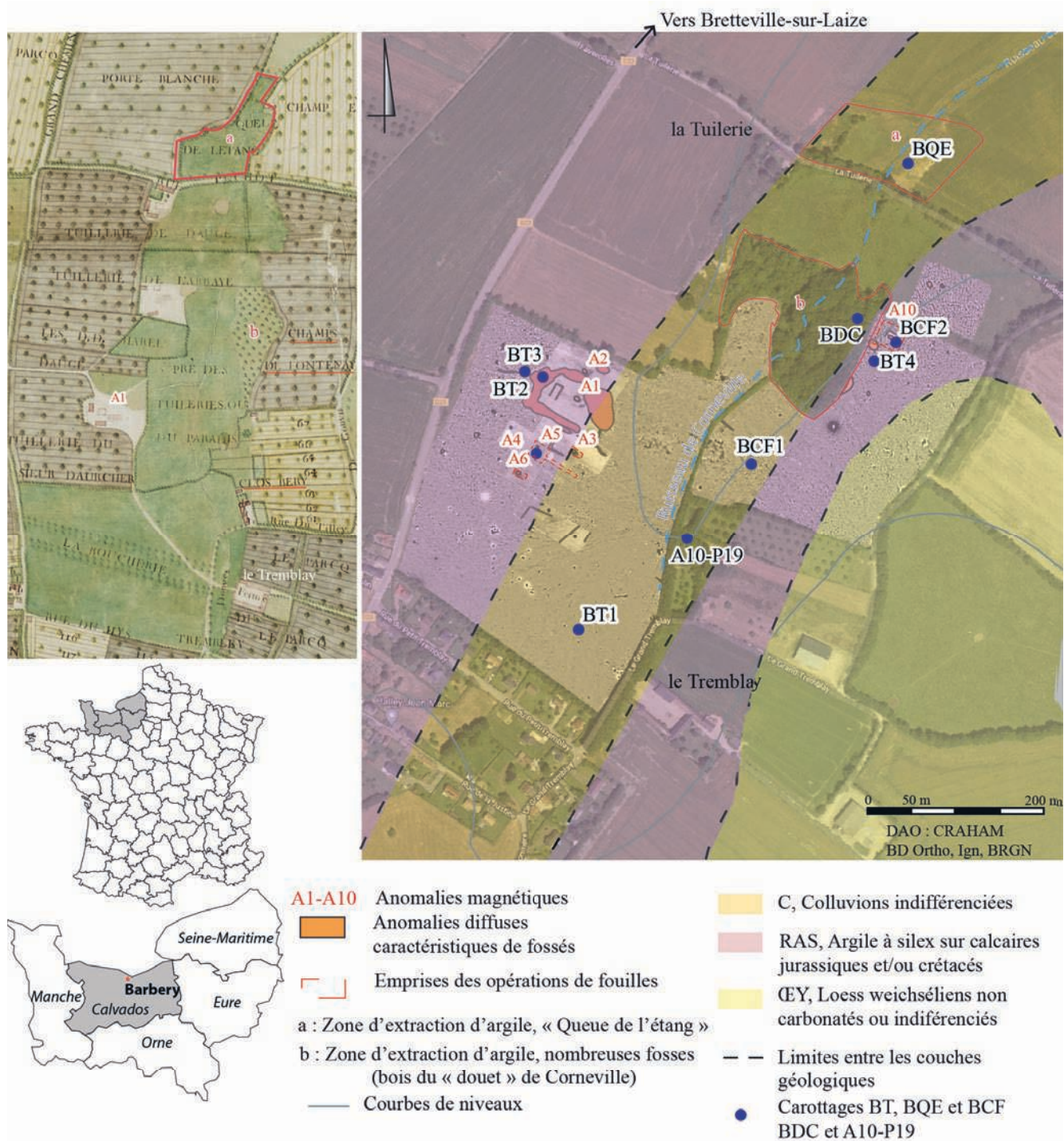


Figure 1 : À gauche, extrait du plan de 1783 localisant le secteur des tuileries de Barbery ainsi que plusieurs lieux mentionnés dans les sources écrites. À droite, localisation des carottages, des lieux d'extraction probables et des anomalies magnétiques matérialisant l'emplacement de fours de tuiliers sur un fond de la carte IGN et géologique. Le four A1 est repéré simultanément sur le plan de 1783 et la carte géologique.

Figure 1: Location of the tileries sector and some places mentioned in the documentations on an extract of the map of 1783. Location of core samplings and magnetic anomalies showing in particular the location of the tilers' kilns on an IGN and geological map.

1. CORPUS ET MÉTHODES EMPLOYÉES

1.1. Corpus analysé

Situées au sud de la plaine de Caen, à l'extrême nord-est du massif armoricain, les tuileries se sont installées sur des formations superficielles constituées de loess (CEY) et de produits d'altération (argile de décalcification, argile à silex (RAS), figure 1). Cette couverture, d'épaisseurs variables, est liée à l'altération des différents calcaires sous-jacents (Jurassique) ou des niveaux plus anciens (Silurien ou Briovérien). Elle présente des faciès et un aspect multiformes dans les proportions en argile et silex. Les fonds de vallée comme celui du ruisseau de Corneville sont colmatés par les colluvions brunâtres, sablo-limoneux, issues du remaniement des altérites (figure 1). Le croisement des données de la carte géologique, des observations topographiques, de l'analyse archéologique et des éléments recueillis dans la documentation écrite nous a guidés dans le choix des lieux de prélèvements afin de caractériser les matériaux argileux disponibles et ceux les plus adaptés pour le développement de la production de terre cuite architecturale.

En 1582, Pierre Lemièrre est autorisé à extraire de la terre « ... pour faire thuyllle au lieu ou il a accoustumé en prendre sur l'heritage deppendant d'icelle abbaye a ll'entour du petit estang au moins de dommage que faire ce pourra »⁷. Il s'agirait de l'étang de Corneville qui est mentionné sur le plan de 1783, si l'on en croit des témoins qui affirment en 1638 que l'abbé Thuault a fait « aplanir une piece de terre assise a Corneville qui contient environ une acre qui estoit presque inutile a raison de plusieurs fosses auxquelles ont avoit tiré les terres pour faire de la thuille »⁸. Il semble que des extractions se concentrent dans ce secteur de la Queue de l'Étang (figure 1). Les sources mentionnent aussi l'exploitation de terre à la Pillière⁹ ainsi que l'extraction de terre que l'on « tire » à proximité immédiate des tuileries¹⁰ ; ou encore, lors d'un règlement concernant la tuilerie du Clos Berry en 1693, il est précisé que l'extraction doit se limiter à la partie du Clos la plus proche des Champs de Fontenay¹¹. La reconnaissance de ces lieux a été facilitée également par la fossilisation dans

le paysage d'une concentration de fosses d'extraction situées dans le bois traversé par le ruisseau de Corneville (figure 1, noté « b », entre l'emplacement des tuileries mentionnées sur le plan de 1783 et les Champs de Fontenay).

À partir de toutes ces données, et en tenant compte des contraintes du terrain, plusieurs carottages (BT1 à 4, BQE et BCF1 et BCF2¹²) ont été implantés (figure 1). BQE et BCF1 sont localisés dans la zone d'extraction mentionnée dans les sources écrites présentées ci-dessus, les autres carottages ont été pratiqués afin de documenter les ressources géologiques locales.

Les sept carottages, à des profondeurs variant de 200 à 700 cm¹³, ont été conduits d'abord en gouge ouverte de 8,8 cm de diamètre pour observer le sédiment extrait et ensuite en gouge fermée de 6,6 cm une fois le niveau argileux atteint afin de perturber le moins possible le prélèvement.

À partir des observations macroscopiques, trente-et-un prélèvements ont été sélectionnés uniquement sur les portions argileuses des carottes¹⁴. Ces échantillons sont enregistrés avec le numéro du carottage suivi de la profondeur. Par exemple BT1-120 correspond à l'échantillon provenant de la profondeur 120 à 143 (annexe 1). Ils ont fait l'objet d'analyses géomécaniques (granulométrie laser, granulométrie par pipette de Robinson et essais d'Atterberg). Ces analyses ont été complétées par celles de trois prélèvements d'argile de surface : le premier en contexte de fouille (terrain naturel, TN) entre les fours A4 et A5 (A4/A5 P16), le deuxième dans le bois à proximité du ruisseau de Corneville (BDC) et le troisième provenant du curage de l'étang situé dans la zone anciennement appelée clos Berry (A10-19) [tableau 1 et annexe 1]. Une partie de ces matériaux, y compris les prélèvements de surface, pour lesquels la quantité de matière était suffisante et représentative des différentes argiles, a fait l'objet d'analyses chimiques et/ou pétrographiques (tableau 1).

Ces analyses physico-chimiques ont également été mises en œuvre sur une quarantaine de terres cuites architecturales (TCA) afin d'étudier les similarités de composition entre les matériaux argileux et les produits finis (tableau 1). Le choix et la provenance de la matière utilisée comme liant (« mortier ») pour la construction des fours de tuiliers seront aussi abordés à partir de ces résultats.

7. Arch. dép. Calvados, H 1457, bail de la tuilerie des religieux de Barbery à Pierre Le Myere pour 5 ans (2 janvier 1582 ns).

8. Arch. dép. Calvados, H 1792. Une grande partie des terres dans le secteur de l'étang de Corneville appartiennent à l'abbaye de Barbery.

9. Arch. dép. Calvados, 8 E 3259, 24 novembre 1652. Ce lieu n'est pas localisé sur la figure 1.

10. Lors de la vente des biens nationaux, concernant la tuilerie de l'abbaye de Barbery, il est indiqué « que la pièce de la tuilerie sur laquelle est bâtie ladite tuilerie forme l'emplacement ou se tire la terre propre à cette fabrique » (Arch. dép. Calvados, 1 Q 1221, n° 299).

11. Arch. dép. Calvados, 8 E 3275, 27 septembre 1693.

12. Les carottages sont identifiés en fonction des lieux d'implantation : BT = Barbery Tremblay ; BQE = Barbery Queue de l'Étang ; BCF = Barbery Champs de Fontenay.

13. Les profondeurs des prélèvements sont indiquées en cm.

14. Les prélèvements en gouge ouverte et la moitié des carottes en gouge fermée sont archivés au Craham et chez Idees-Caen. Les quatre premiers mètres du carottage BT2 correspondent à un dépotoir de terres cuites, l'argile en place a été atteinte à 650 cm de profondeur.

	Nombre d'échantillons par technique de caractérisation							
	Granulo Laser	Granulo Robinson	Atterberg / Limite de plasticité	Atterberg / Limite de liquidité	Valeur au bleu de méthylène (VBS)	Colombin	Chimie / DRX	Pétrographie
Matières argileuses des carottes	31	4	27	10	28	23	23/2 sur cru et cuit	9
BDC	1	1	1		1	1	1	
A10 P19	1	0	1		1	1	1	
TN (A4/A5 P16)							1	
TCA (tuile, brique, carreau et paroi de four)							43/2	13
Liant							6	

Tableau 1 : Corpus des échantillons étudiés selon les techniques de caractérisation.
Table 1: Inventory of the samples studied.

1.2. Techniques de caractérisation employées

La granulométrie par diffraction laser et par sédimentation à la pipette de Robinson, les essais d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène permettent une première caractérisation des matériaux et une classification après détermination de leur texture, de leur comportement et propriétés physiques. L'analyse granulométrique consiste à mesurer la taille des particules élémentaires < 2 mm (argiles, limons et sables) des grains d'un sol et d'en définir les fréquences statistiques pour caractériser les textures auxquelles sont liées de nombreuses propriétés géotechniques et hydrogéologiques. La granulométrie par diffraction laser est une technique basée sur la diffraction de la lumière. L'intensité du rayonnement diffracté et l'angle de diffraction sont fonction de la taille des particules : une particule sphérique, frappée par un rayon laser fixe, diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille. Cependant, les résultats obtenus par diffraction laser montrent une sous-estimation des particules fines, celles-ci n'étant pas sphériques. Pour déterminer la texture en utilisant par exemple la classification des sols de Jamagne (Richer de Forges *et al.*, 2008), la limite de la fraction argileuse mesurée au diffractomètre a été modifiée à $6,8 \mu\text{m}^{15}$ comme recom-

15. Valeur déterminée pour le granulomètre Malvern 2000 utilisé pour nos mesures.

mandé par Mako *et al.* 2017 au lieu de $2 \mu\text{m}$. Ces résultats sont cohérents avec les observations publiées par plusieurs auteurs (Konert & Vandenberghe, 1997; Ramaswamy & Rao, 2006; Antoine *et al.*, 2009). Les résultats sont traités par Gradistat et l'indice de tri utilisé est celui de Folk et Ward (Folk & Ward, 1957).

La valeur au bleu de méthylène caractérise l'argilosité d'un sol et sa capacité d'adsorption ionique. Notée VBS (valeur au bleu du sol), cette valeur représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et les espaces interfoliaires des particules argileuses. C'est une grandeur directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. L'essai (NF P 94-068) consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène (en grammes) pouvant être adsorbée par le matériau (particules < 5 mm) mis en suspension dans l'eau, rapportée à 100 g de la fraction granulométrique comprise entre 0 et 50 mm du sol étudié.

Les essais d'Atterberg¹⁶ permettent de définir, d'une part, la limite de plasticité (WP) qui caractérise le passage d'un sol de l'état solide à l'état plastique par la méthode au rouleau (NF P 94-051) et, d'autre part, la limite de liquidité

16. Pour les essais d'Atterberg, environ 200 g de sol sont mis à imbiber dans un récipient d'eau pendant au moins 24 h. Le matériau est tamisé par voie humide à $400 \mu\text{m}$. L'eau de lavage et le tamisat sont recueillis dans un bac. Après décantation de 24 h, l'eau est siphonnée puis l'eau résiduelle est évaporée sans chauffage.

(WL) qui caractérise le passage d'un sol de l'état plastique à l'état liquide grâce au cône de pénétration (NF P 94-052-1). Le calcul de l'indice de plasticité ($IP = WL - WP$) mesure l'étendue du domaine de plasticité. La quantité de matériau disponible étant trop faible pour certains prélèvements, la limite de liquidité n'a pu être réalisée qu'en regroupant des échantillons (pool) d'un même carottage présentant les mêmes caractéristiques granulométriques, la même valeur au bleu de méthylène et la même limite de plasticité. Cinq pools ont ainsi été créés. B1 rassemble les prélèvements du carottage BQE réalisés entre 266 et 300 cm, entre 338 à 377 cm et 467 à 492 cm. B2 correspond au regroupement des échantillons du carottage BT2 entre 650 et 690 cm. B3 est l'assemblage des échantillons du carottage BT 3 de 135 à 175 cm. B4 regroupe les deux échantillons de BT4 prélevés de 112 à 120 cm et celui de 204 à 220 cm. Pour la carotte BCF2, l'échantillon 116 à 160 cm a été associé avec celui de BCF2 230 à 256 cm (annexe 1).

Des essais empiriques ont permis d'observer également le comportement des différents échantillons au malaxage, façonnage, séchage (retrait) et à la cuisson à 500, 700 et 900 °C selon les indications du potier B. Leach (Leach, 2003, p. 77)¹⁷ et les gammes de températures des réactions et transformations des minéraux argileux (Thorez, 2003). La plasticité de l'argile au sens large est évaluée par un test simple : un colombin de 10 cm de long sur 1 cm de diamètre en terre franche (D'Anna *et al.*, 2003, p. 282) est réalisé. Sa résistance à la flexion (courbure, fissure, cassure) permet de qualifier la plasticité ainsi que la malléabilité (Rekk, 2014). Le séchage à l'air des colombins ou bâtonnets permet d'évaluer et de caractériser le retrait. Une fois secs, les colombins sont cuits selon trois paliers de température, 500, 700 et 900 °C, dans un four à moufle¹⁸. La cuisson permettra d'évaluer éventuellement la fusibilité, de connaître les teintes du matériau en atmosphère oxydante et de compléter les observations macroscopiques en mettant en évidence la présence d'inclusions non plastiques tels que des sels (pyrite, sulfure de fer) ou carbonates de calcium. Si ceux-ci sont présents, ils migrent vers la surface lors du séchage et forment des efflorescences, provoquant des fissures ou craquelures au moment de la cuisson.

De manière très ponctuelle, des diffractogrammes de rayons X ont pu être enregistrés sur des échantillons argileux

17. Nous avons modifié et adapté ces essais selon notamment le protocole proposé par Rekk en 2014 ou dans Allinne & Léon, 2015. Les exigences de plasticité d'une matière première pour le moulage d'une tuile ou d'une céramique montée au colombin sont moins importantes que pour une céramique tournée. Ces types d'observations sur le façonnage du colombin seront utilisées dans le cadre d'autres études.

18. La cuisson est réalisée en atmosphère oxydante, avec une montée de 100 °C par heure. Le refroidissement est lent pour la cuisson à 900 °C et un refroidissement rapide pour les cuissons à 500 et 700 °C.

crus et cuits à 500 °C ainsi que sur des TCA afin d'identifier le cortège minéralogique global (tableau 1).

Les compositions chimiques ont été obtenues par spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES, Optima DV 2100 de Perkin Elmer). Les échantillons de matières premières crues, ainsi que les fragments de TCA préalablement nettoyés, sont broyés dans un mortier en carbure de tungstène à l'aide d'un broyeur planétaire. Après une calcination à 1000 °C, 100 mg d'échantillon sont mis en solution dans un mélange d'acide nitrique à 5 % et acide chlorhydrique 2,5 % après une fusion alcaline avec du métaborate et du bromure de lithium (1 g). Le dosage de 20 éléments chimiques est réalisé grâce à une calibration au moyen de 8 étalons géochimiques (CRPG-SARM de Nancy) et d'un blanc préparé avec du métaborate et bromure de lithium (blanc réactif). Un échantillon d'argile, Airl D, et des étalons de contrôle sont analysés avec chaque série afin de suivre les dérives éventuelles tout au long des mesures. Les résultats sont exprimés pour les éléments majeurs et mineurs en % poids oxyde (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO et P_2O_5) et pour les éléments en traces en ppm (Ba, Sr, V, Zr, Rb, Y, Zn, Cr, Ni, Ce) et normalisés à 100 % pour une perte au feu et l'oxyde de phosphore nuls.

2. RÉSULTATS

2.1. Caractérisation des matières premières

Les argiles des carottes BT-1, 2, 3, 4 et BCF2 sont de couleur jaune ainsi que celles des niveaux supérieurs de BT4 et BQE (annexes 1 et 2). À partir de 200 cm dans les carottes BQE et de 350 cm dans BCF1, les matériaux argileux sont de couleur violette ou bariolée à dominante rouge avec des zones gris clair. Aucun grain n'est visible à l'œil nu sauf quelques exceptions (grains > 2 mm et tendres). Des zones plus compactes, tendres aussi, contiennent des concentrations riches en oxyde de fer. Macroscopiquement, les niveaux d'argile bariolée semblent similaires dans ces deux secteurs de la Queue de l'Étang (BQE) et des Champs de Fontenay (BCF 1). Les analyses sédimentologiques et géomécaniques (figure 2 et annexes 2 et 3) montrent que les sédiments des carottes BT-1 à 4 ainsi que BCF2, principalement de couleur jaune très fins, sont à dominante argileuse, BT1 à partir de 260 cm, comme BT2 à partir de 650 cm, BT3 à 135 cm ou BT4 à partir de 100 cm de profondeur ou BCF2 à 116 cm. La distribution granulométrique est dominée par la classe des argiles (entre 51 et 68 %) mais ces sols sont plutôt mal triés (répartition tri ou polymodale). Les valeurs au bleu de méthylène (VBS) sont également élevées (entre 4 et 8,7),

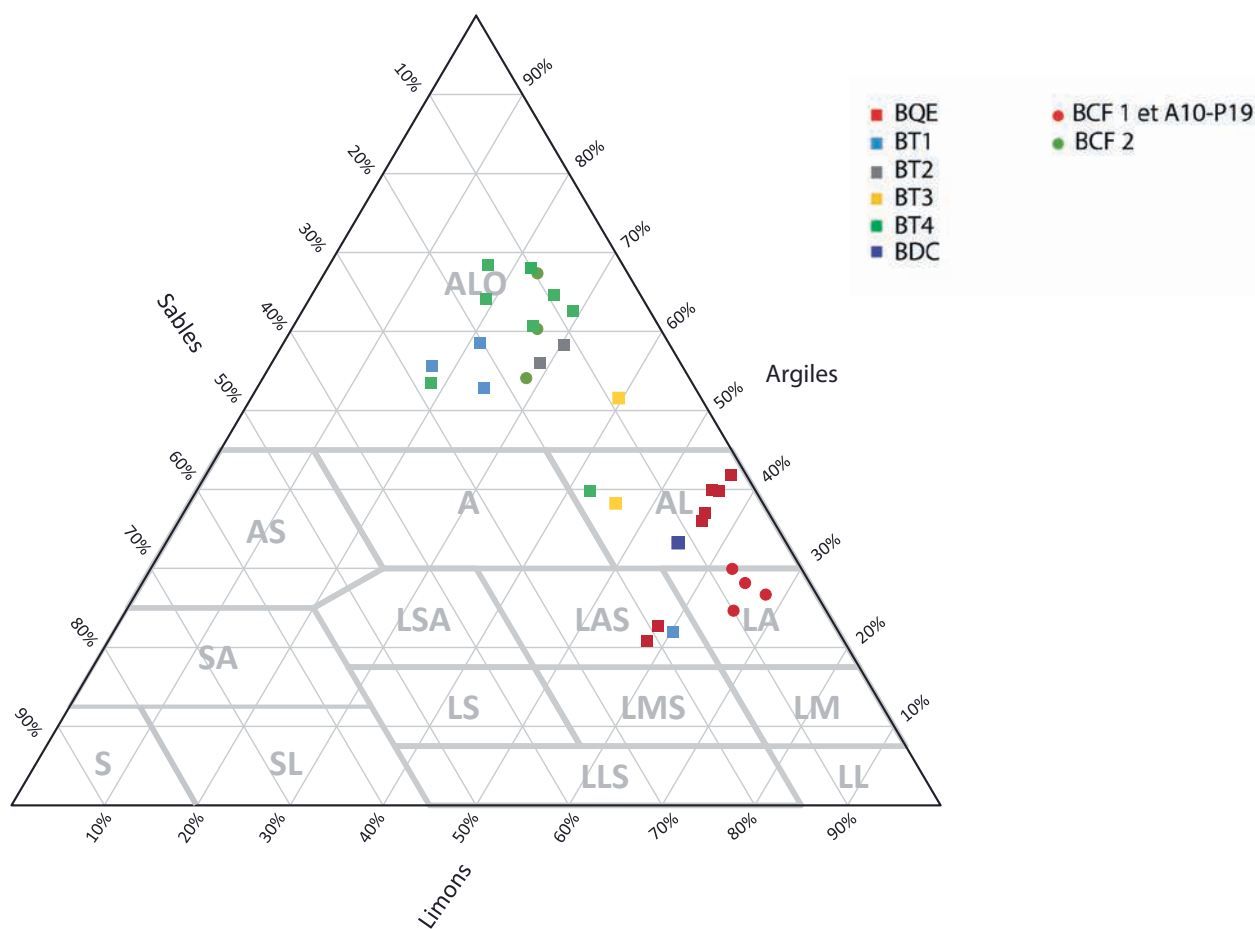


Figure 2 : Diagramme triangulaire de Jamagne pour tous les échantillons argileux de Barbery étudiés.
 Figure 2: Jamagne's triangular diagram for all the studied clay samples of Barbery.

Légende des abréviations utilisées dans le diagramme : ALO : argile lourde ; AS : argile sableuse ; A : argile ; AL : argile limoneuse ; L : limon ; SA : sable argileux ; LSA : limon sablo-argileux ; LAS : limon argilo-sableux ; LA : limon argileux ; S : sable ; SL : sable limoneux ; LS : limon sableux ; LMS : Limon moyen sableux ; LM : limon moyen ; LLS : limon léger sableux ; LL : limon léger.

Legend of abbreviations used in the diagram: ALO: heavy clay; AS: sandy clay; A: clay; AL: silty clay; L: silt; SA: clayey sand; LSA: sandy clay loam; LAS: clayed sandy loam; LA: clayey silt; S: sand; SL: loamy sand; LS: sandy silt; LMS: medium sandy loam; LM: medium loam; LLS: sandy silt loam; LL: light silt.

DAO à partir d'une macro-commande développée par Idees-Caen
 DAO from a macro command developed by Idees-Caen

témoin d'un sol limoneux à très argileux pour les valeurs supérieures à 8. En ce qui concerne les prélèvements dans les argiles bariolées de BQE et BCF1, le sol est à dominante de limon (silt) sur l'argile et une proportion variée de sable (entre 1,5 et 12 %) est enregistrée permettant de qualifier la distribution de bi-modale. Les VBS (entre 2,7 et 3,1) correspondent à des sols limoneux de plasticité moyenne.

Les résultats des essais d'Atterberg (limites de plasticité (WP) et de liquidité (WL)) sont cohérents par rapport au VBS, c'est-à-dire que les argiles jaunes (B2, BCF2, B3 et B4) sont dans le domaine des argiles ou limons très plastiques,

tandis que B1, BCF1, A10-P19 sont dans le domaine des limons moyennement ou peu plastiques (annexe 3).

Parallèlement, des essais techniques pour évaluer l'aptitude au façonnage à partir de colombins ainsi que le comportement au séchage et à la cuisson, ont montré que le retrait est plus élevé pour les échantillons de la carotte BCF2 (entre 7-12 %¹⁹) que pour les argiles bariolées de BCF1 et

19. Le retrait au séchage a été simplement observé sur les colombins pour les échantillons des carottes BT1-4 et BQE alors que nous avons évalué le retrait au séchage et à la cuisson en réalisant des bâtonnets de 10 cm de long pour les carottes BCF1 et 2. Il serait plus judicieux de procéder à

de A10-P19 (entre 4 et 6,5 %). Un retrait au séchage moins élevé, comme celui observé sur l'argile bariolée de BQE et de BCF1, permettra aux tuiliers de respecter plus facilement la confection de tuiles aux dimensions recommandées. En effet, il est probable, même si nous n'en avons aucune preuve pour Barbéry, que la taille des tuiles soit réglementée par des normes tout comme celle des tuiles à Paris en 1567 (Van Ossel *et al.*, 1998).

Les prélèvements cuits à 500, 700 et 900 °C ont mis en évidence une couleur finale orangé-rouge pour les argiles jaunes alors qu'elle est plutôt violet/marron, localement plus claire et un toucher doux pour les échantillons BDC et A10-P19 et ceux des carottes BCF1 et BQE (annexe 3).

L'étude pétrographique a été réalisée sur les prélèvements cuits à 500 °C. Trois groupes ont été identifiés pour les argiles jaunes : les argiles à oolites ferrugineuses, les argiles très siliceuses et les argiles d'altération à silex. Les argiles bariolées constituent un quatrième groupe (figure 3).

Les échantillons BT1-354, BT2-650, BT4-204 et BT4-280 constituent le groupe pétrographique des argiles à oolites ferrugineuses. Ces argiles se caractérisent par une fraction grossière assez abondante. Ces éléments non plastiques apparaissent mal triés avec une fréquence de l'ordre de 25 %²⁰. Les principaux minéraux observés, avec une fréquence de 10 %, sont des quartz suballongés à subarrondis, d'une taille moyenne de 200-250 µm, et des oolites ferrugineuses dont les plus grossières mesurent un millimètre. Leur nucléus est majoritairement constitué d'un fragment de bioclaste (notamment des échinodermes). Ces oolites sont sphériques et vraisemblablement issues de formations jurassiques, contrairement à celles observées dans BT4-280 où elles prennent la forme d'inclusions ellipsoïdales provenant plutôt des formations ordoviciennes (Deroin *et al.*, 1999, p. 37). Dans ces sédiments figurent également des éléments ferrugineux ne dépassant pas 400 µm, des fragments de bioclastes, ainsi que des minéraux de couleur jaune-orangé de nature indéterminée (des minéraux phosphatés?).

Ces échantillons sont classés dans un même groupe chimique dans lequel ont été ajoutés les prélèvements d'argile de couleur jaune ou marron (BT1-260, BT2-675, BT4-248 et BCF2) qui n'ont pas fait l'objet d'observation en lame mince²¹. Ils sont caractérisés par des compositions très

hétérogènes et dispersées ; les valeurs en oxyde de fer (Fe₂O₃) sont très élevées (entre 14 et 57 %). Les oolites ferrugineuses (riches en hématite ou sidérite), identifiées dans les lames minces, expliqueraient ces teneurs élevées en fer. L'oxyde de manganèse présente, dans les argiles jaune ou marron, les concentrations les plus élevées de tous les échantillons analysés (MnO entre 0,14 et 0,65 %), tandis que l'oxyde de phosphore est observé dans tous ces sols (entre 0,5 et 2,6 %) [tableau 2]. Macroscopiquement, nous avons observé des petits grains sombres²², il s'agit sans doute de pyrolusite (MnO₂) dispersée dans le sédiment. Le manganèse (Mn²⁺) est un élément très mobile, la matière organique peut se minéraliser et se combiner avec les composés ferromanganeux. La perte au feu est beaucoup plus élevée dans cette série d'échantillons, témoignant de la présence d'éléments organiques et volatils en plus grandes quantités (jusqu'à 13,24 % pour BT4-204). Parmi les éléments en traces, on remarque pour ce même échantillon BT4-204 une teneur particulièrement élevée en yttrium (jusqu'à 1000 ppm) ; cet élément chimique pourrait être associé à la monazite, minéral phosphaté. Ce taux élevé en phosphate dans le matériau argileux pourrait-il provenir d'une pollution agricole, qui aurait percolé dans le sol ?

Les échantillons BT1-120 et BQE-83 définissent un petit groupe pétrographique homogène et caractéristique des « argiles très siliceuses » (figure 3). La fraction fine est dominante sur la fraction grossière. Les inclusions (dans cette fraction fine) apparaissent bien triées, de taille comprise entre 50 et 100 µm, avec une fréquence de l'ordre de 40 %. Ce sont surtout des petits grains subarrondis et suballongés de quartz, accompagnés de quelques muscovites ne dépassant pas les 2 à 5 %. Ces quartz peuvent être occasionnellement fracturés et de plus grande taille (300 µm). Ils sont accompagnés de rares grains de glauconie, dont la taille varie entre 100 et 200 µm. Le cortège minéralogique est enfin complété par de rares oolites, d'un aspect subarrondi et dont les plus grossières avoisinent le millimètre, quelques lithoclastes, silex et grains dont la structure cristalline évoque la calcédoine. BQE-83 comporte davantage d'inclusions grossières (silex et grains ferrugineux). Du point de vue chimique, ces échantillons ainsi que BQE-50 ont une composition homogène (tableau 2). L'alumine est en faible quantité (10 % à 12 %) par rapport aux argiles à oolites ferrugineuses. Le fer varie entre 7 et 8 %, en proportion suffisamment élevée pour expliquer la couleur orangée des colombins cuits entre 500 et 900 °C. L'élément dominant est la silice (entre 75 % et 77 %)

prisonniers dans un ciment argileux jaune pour le prélèvement BCF2-320 (cf. figure 47 Bocquet-Liénard *et al.*, 2021, p. 63).

22. Ces grains sombres pourraient être des indices de glyfication.

la détermination de la limite de retrait (courbe de Bigot) sur les différents prélèvements, mais la mesure de cette valeur nécessite un équipement spécifique (voir norme NF P 94-060-2) et des essais de dessiccation d'une éprouvette cylindrique, que nous n'avons pas à notre disposition.

20. Les fréquences ont été déterminées à partir des chartes d'estimation visuelle du pourcentage (Matthew *et al.*, 1991).

21. Même si BCF2 n'a pas fait l'objet d'analyse pétrographique, les oolites ferrugineuses ont pourtant bien été identifiées comme le montre la photo de ces grains arrondis de taille comprise entre 0,2 et 0,5 mm,

caractéristique des sédiments sableux, avec une proportion élevée en zirconium.

Un échantillon (BT3-135), prélevé dans le niveau des argiles résiduelles à silex, se caractérise par une matrice très fine où de très rares quartz ont été identifiés (figure 3). La fraction grossière, de l'ordre de 25 % en proportion, comporte principalement des grains de silex et des agrégats, de

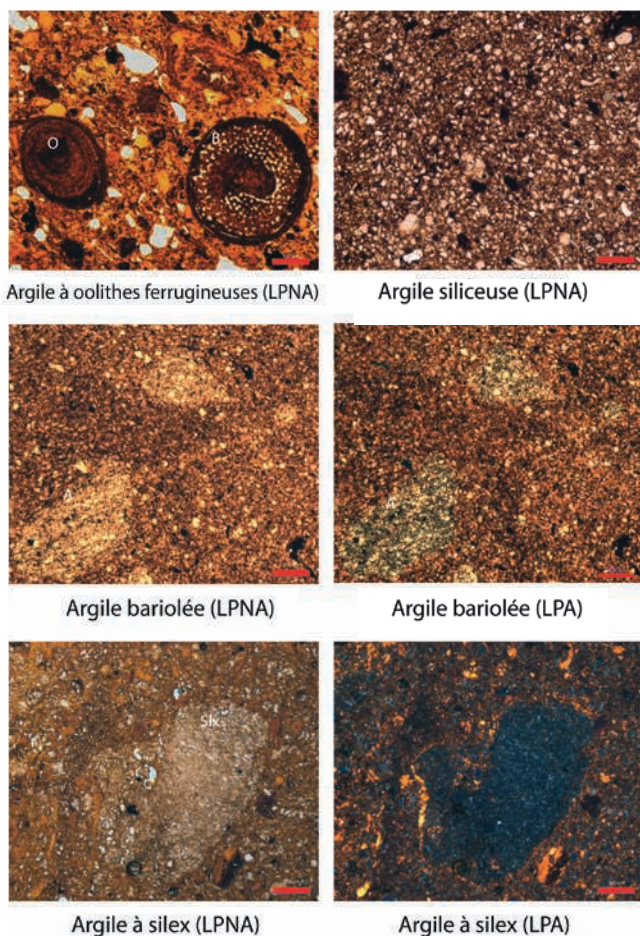


Figure 3 : Fraction fine et inclusions non plastiques dans les différents matériaux argileux de Barbery cuits à 500 °C.

Figure 3: Fine fraction and non-plastic inclusions in the different Barbery clay materials fired at 500 °C.

Les photos sont en lumière polarisée non analysée (LPNA) ou en lumière polarisée analysée (LPA). Le trait équivaut à 200 µm sauf pour l'argile à oolithes où le trait vaut 100 µm. Légende des abréviations dans les photos : O = oolithe ; Slx = silex ; A = argilite/siltite ; B = bioclaste.

The pictures are in unanalyzed polarized light (LPNA) or in analyzed polarized light (LPA). The line is equivalent to 200 µm except for the oolitic clay where the line is 100 µm. Legend of abbreviations in the photos: O = oolite; Slx = flint; A = clay/siltite; B = bioclast.

cl. Thierry, Craham

morphologie subarrondie et suballongée et dont les plus grossiers mesurent 1,4 mm. Ces grains sont accompagnés d'éléments ferrugineux et de grains siliceux monocristallins n'excédant pas 150 µm. De plus, des grumeaux d'argilite, d'un aspect lité et de couleur jaunâtre, pouvant parfois atteindre 600 µm, ont également été observés, témoins d'un sol remanié. Sa composition chimique est très riche en silicium (71 %) et en fer (9 %) et contient très peu d'alcalins ($K_2O+Na_2O+CaO = 1,3\%$) [tableau 2]. Cette matière première de couleur jaune devient rouge-orangé après cuisson à 900 °C (annexe 3).

Les échantillons BQE-266 et -377 ont été prélevés dans les argiles bariolées rose-violet et gris-blanc très fines²³ : de rares inclusions sont visibles à l'œil nu pour le premier et aucune pour le second. Les lames minces ont été réalisées à partir des colombins préparés à partir du matériau argileux malaxé, ce qui peut expliquer l'absence d'agrégats visibles à l'œil nu. Pour l'échantillon BQE-266 (argile rose-violet), la fraction fine est composée de nombreux minéraux, se caractérisant par un faible relief, difficile à identifier ; les teneurs élevées en oxyde d'aluminium nous ont d'abord orienté vers une argile du groupe kaolinite. Afin de déterminer les minéraux présents dans ces deux échantillons BQE-266 et -377, nous avons eu recours à la diffraction des rayons X sur poudre crue et cuite à 500 °C²⁴. La kaolinite a bien été identifiée sur les spectres de diffraction-X des échantillons cru et cuit²⁵ ainsi que la pyrophyllite (figure 4). Au microscope, d'autres minéraux, moins nombreux et allongés, s'apparentent à de l'illite/muscovite qui est aussi reconnue sur le diffractogramme. De très rares quartz sont également observables. La fraction grossière n'est que peu représentée, avec des éléments figurés, non triés, apparaissant avec une fréquence de l'ordre de 10 %. Les quelques inclusions identifiées dans cette fraction grossière

23. Nous n'avons pas eu la possibilité de faire des lames minces dans les sédiments de la carotte BCF2. Cependant les caractéristiques macroscopiques et géomécaniques tendent à montrer que ces sédiments sont très similaires et de même nature.

24. Les analyses par diffraction-X ont été réalisées par Nadia Cantin et Virginie Moineau du laboratoire Archéosciences Bordeaux. Afin de distinguer les minéraux argileux proprement dit, le protocole habituel nécessite une sédimentation de l'échantillon suivant la loi de Stokes afin d'extraire les particules inférieures à 2 µm et préparer une lame orientée. Certains minéraux ont des réflexions basales voisines, des traitements thermiques ou à l'éthylène glycol permettent de modifier l'écartement des distances interréticulaires fondamentales ou de changer l'intensité des raies. Ce dernier n'a pas été pratiqué car le traitement à l'éthylène glycol permet surtout de différencier les minéraux argileux à structure gonflante, ce que les essais au bleu de méthylène (VBS) pour les échantillons BQE ne semblent pas montrer (annexe 3). L'hypothèse de la chlorite peut être écartée parce qu'il n'y a pas de pic à 14 Å dans le diffractogramme.

25. La kaolinite est encore identifiée à 500 °C parce que la durée de la cuisson des essais empiriques n'a pas dépassé une heure.

AnalyseNum	Couleur	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	PF %	Ba	Sr	V	Zr	Rb	Y	Zn	Cr	Ce	
% poids oxyde													ppm									
<i>Matières premières carottes</i>																						
BT1-120	jaune plus clair	75,91	12,39	6,56	0,86	0,69	0,90	0,89	1,76	0,05	0,17	4,59	407	171	127	403	106	44	74	141		
BT1-260	jaune	45,55	21,99	27,25	0,88	0,89	1,22	0,13	1,57	0,53	0,99	10,73	584	411	634	188	132	419	297	587	ND	
BT1-354	jaune-marron	36,24	20,34	38,67	0,73	1,50	1,04	0,10	1,07	0,32	1,72	11,63	410	295	753	180	149	147	416	592		
BT2-650	jaune	43,62	18,52	30,85	0,77	3,24	0,92	0,15	1,40	0,53	2,58	10,56	599	244	617	214	110	156	474	425	ND	
BT2-675	jaune	51,01	18,89	23,34	0,84	2,85	0,89	0,19	1,79	0,20	2,08	8,79	461	242	521	285	132	138	504	410		
BT3-135	jaune	71,51	16,36	9,79	0,40	0,53	0,51	0,11	0,79	0,01	0,10	7,68	150	30	165	81	148	19	142	481	ND	
BT4-204	jaune-brun	47,31	21,33	26,09	1,02	0,77	1,30	0,14	1,90	0,14	1,18	13,24	633	587	549	203	143	1099	850	501		
BT4-248	jaune-marron	56,91	20,13	15,76	0,97	2,04	1,33	0,14	2,55	0,16	1,59	8,26	408	277	287	138	188	161	239	240	ND	
BT4-280	jaune	57,09	20,94	14,00	0,99	2,57	1,38	0,15	2,66	0,21	1,83	8,26	366	218	238	175	176	138	211	221		
BDC	marron-brun	61,43	23,91	9,44	1,12	0,57	0,58	0,55	2,31	0,09	0,27	8,69	429	548	406	255	154	41	135	162	ND	
BQE-50	marron	76,32	10,74	8,62	0,90	0,60	0,50	0,78	1,49	0,05	0,29	4,71	328	109	146	498	101	39	64	200		
BQE-83	marron	77,90	10,53	7,29	0,89	0,55	0,48	0,80	1,52	0,03	0,23	4,66	332	119	125	477	106	40	54	140		
BQE-266	marron-violet	53,33	30,92	10,56	1,11	0,45	0,46	0,42	2,72	0,02	0,17	8,04	535	855	528	113	187	34	53	211		
BQE-327	violet	47,14	28,24	19,67	1,07	0,28	0,43	0,35	2,82	0,00	0,15	7,03	769	584	976	105	190	32	56	159	ND	
BQE-338	marron-violet	52,53	31,36	10,77	1,11	0,30	0,46	0,43	2,99	0,04	0,13	7,39	535	661	864	103	196	33	32	178		
BQE-467	marron-violet	53,63	31,34	9,62	1,14	0,31	0,48	0,43	3,05	0,01	0,14	7,30	565	700	786	110	205	34	35	428		
BQE-377	gris	58,67	33,92	1,44	1,28	0,33	0,55	0,44	3,37	0,00	0,11	7,38	567	499	819	100	216	31	37	152		
A4/A5 P16	TN, jaune	62,03	18,53	15,12	0,88	0,85	0,88	0,27	1,40	0,03	0,42	7,81	603	290	227	343	151	61	112	171	444	
BCF1 374-400	beige, gris clair	54,25	32,10	8,33	1,50	0,36	0,42	0,53	2,50	0,01	0,21	8,29	667	960	154	199	161	33	44	133	132	
BCF1 425-470	gris clair	56,06	32,46	6,29	1,47	0,35	0,44	0,50	2,43	0,01	0,18	7,46	643	754	164	198	195	33	43	138	134	
BCF1 517-550	brun rosé	53,92	29,16	12,33	1,28	0,31	0,36	0,46	2,18	0,01	0,12	6,15	689	382	168	205	166	35	49	152	113	
A10-P19	beige, gris clair	52,78	33,04	8,45	1,14	0,49	0,58	0,56	2,95	0,02	0,16	8,25	590	989	596	135	192	30	109	140	136	
BCF2 116-160	jaune marron	50,90	20,16	22,88	1,05	0,78	1,31	0,17	2,11	0,65	1,27	9,15	895	917	517	319	166	138	802	563	449	
BCF2 230-256	jaune	55,72	21,97	16,07	1,10	0,66	1,32	0,19	2,81	0,15	0,58	8,07	365	190	220	218	183	90	173	213	87	
BCF2_320-340 + 350-386	jaune orangé	22,26	15,56	57,11	0,74	2,13	0,95	0,13	0,73	0,37	2,19	12,03	117	57	1089	224	69	61	491	1233	65	
BRB2019_BCF2_400	jaune orangé	20,34	15,72	57,95	0,67	2,81	1,05	0,14	0,81	0,50	2,55	12,11	171	68	1004	266	82	100	519	987	101	
<i>Liants</i>																						
A10 P15	orangé-rouge	78,62	10,51	4,96	0,89	0,59	0,82	0,86	2,64	0,10	0,19	1,50	439	122	102	529	109	36	58	96	97	
A10 P16	orangé-rouge	77,78	11,05	5,87	0,88	0,59	0,77	0,90	2,00	0,15	0,14	3,61	455	104	132	479	124	37	72	105	101	
A10 P17	orangé-rouge	78,70	10,89	4,72	0,89	0,63	0,88	1,05	2,17	0,08	0,16	0,60	420	99	80	509	89	40	66	97	100	
A3 P22	orangé-rouge	77,11	11,28	5,72	0,89	1,01	0,85	0,88	2,19	0,07	0,14	1,15	503	178	85	516	104	46	57	108	119	
A3 P24	orangé-rouge	76,13	11,32	6,86	0,91	0,73	0,94	0,88	2,14	0,10	0,22	3,34	413	128	235	532	122	49	74	126	111	
A4 P5b	orangé-rouge	73,99	13,52	6,85	0,95	0,79	0,86	0,89	2,02	0,12	0,19	3,76	569	145	169	474	142	43	78	107	109	

Tableau 2 : Résultats des analyses chimiques par ICP-AES des argiles provenant des carottes de Barbary ainsi que des liants. Les données sont normalisées à 100 % pour une perte au feu et l'oxyde de phosphore nuls. ND = non dosé.

Table 2: Results of ICP-AES chemical analyses of clays from the Barbary core samplings and cements. Data are normalized to 100% for zero loss on ignition and phosphorus oxide. ND = not measured.

Analyses réalisées par M. Perrin, stagiaire au Craham

regroupent des grains de quartz, de glauconie, des grains siliceux monocristallins, des grumeaux argileux et des minéraux jaunâtres de nature indéterminée, ne dépassant pas 150 µm. Les éléments ferrugineux sont davantage représentés, les plus grossiers pouvant mesurer jusqu'à 1400 µm. L'argile gris-blanc (BQE-377), très similaire dans sa composition minéralogique à BQE-266, suggère une même origine géologique. Une différence notable, outre sa couleur claire, est une fréquence plus importante de phyllosilicates dans la fraction fine, alors que les éléments ferrugineux sont moins abondants. De plus, la fraction « grossière » est encore moins

présente (2 à 5 %), avec les mêmes minéraux identifiés que dans BQE-266. Leur taille n'y excède pas 900 µm.

Les échantillons BQE-266 et BQE-377, ainsi que BQE-327, BQE-338 et BQE-467, sont caractérisés par une composition chimique comparable, tout comme les 3 échantillons de BCF1 et le prélèvement provenant du curage de l'étang proche du Clos Berry (A10-P19) [tableau 2]. BQE-266, BQE-327, BQE-338 et BQE-467 possèdent 10 % d'oxyde de fer, avec un taux atteignant 19 % dans l'échantillon BQE-327 prélevé dans une argile violette sombre au sein de la carotte. Dans les matériaux de BCF1, le taux en fer

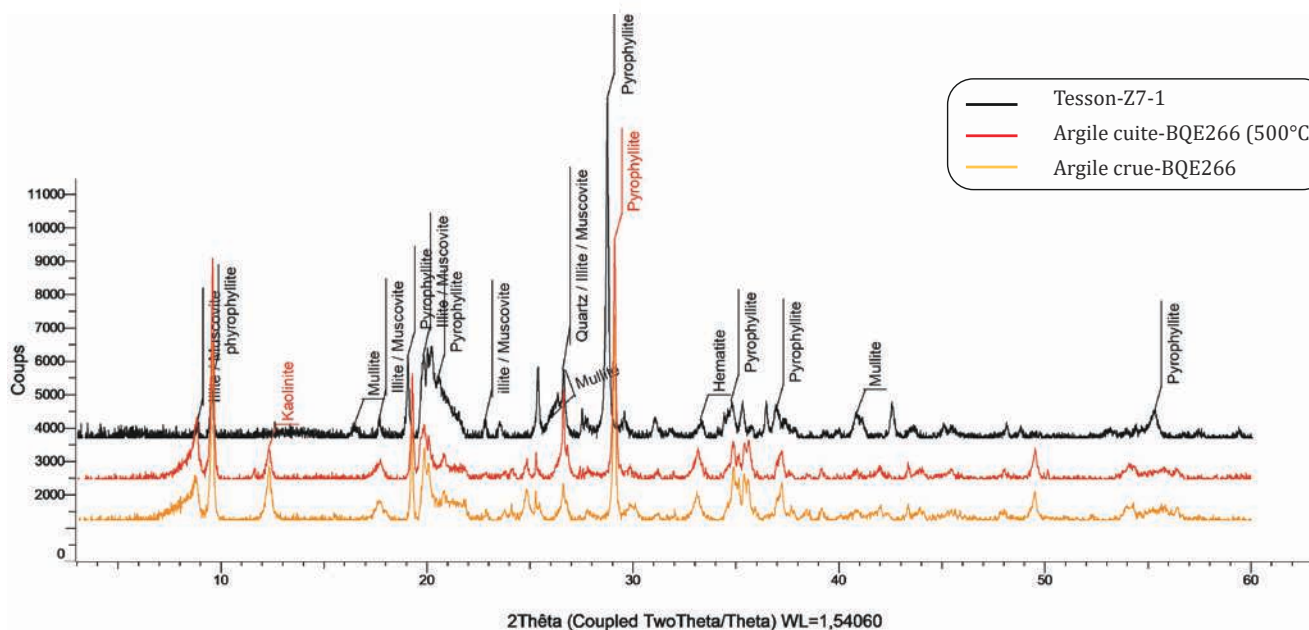


Figure 4 : Diffractogrammes des rayons X de l'argile BQE 266 crue et cuite à 500 °C ainsi que d'un fragment de terre cuite architecturale (Z7-1).
 Figure 4: X-ray diffraction (XRD) diffractograms of clay BQE 266 raw and fired at 500 °C and a fragment of terracotta (Z7-1).

est un peu plus bas, entre 6,3 et 12,3 %. Tous ces matériaux argileux contiennent une proportion très élevée en alumine (30 % en moyenne), élément très abondant dans les minéraux argileux du groupe de la kaolinite ou de la pyrophyllite. La présence de ces phyllosilicates, identifiés par DRX, expliquerait les taux élevés en alumine. La pyrophyllite, minéral relativement inhabituel, peut être issue de l'altération ou du remaniement de schistes métamorphiques ou se former dans les filons hydrothermaux (Deer *et al.*, 1993, p. 326). L'hypothèse d'une altération des ampélites siluriennes, présentes au cœur du synclinal d'Urville dont fait partie le secteur de Barbery, pourrait être envisagée pour la formation de ces argiles bariolées limoneuses. Ce phyllosilicate résultant de l'altération de schistes a déjà été identifié dans la région de Falaise, située à quelques kilomètres de Barbery (Gigot *et al.*, 1999) ou encore à Saint-Nicolas-des-Bois (Orne, Vêrague, 1977). La seule différence entre BQE-377 et les échantillons de couleur rouge-violet comme BQE-266 réside dans le taux en fer qui est, dans ce sédiment de couleur claire, très faible (1,4 %) ²⁶. Parmi les éléments en traces, soulignons les teneurs élevées en strontium alors que le calcium n'atteint pas 0,5 %. Ces échantillons sont également très riches en vanadium (500 ppm). Le zirconium est en très faible quantité (autour de 100 ppm), associé à une faible proportion

26. L'échantillon garde une couleur claire après cuisson à 500, 700 et 900 °C.

de grains sableux. Enfin, il est intéressant de noter que les niveaux correspondant à ces matériaux riches en alumine sont observés à la Queue de l'Étang à partir de 266 cm (au-dessus, de la vase a empêché l'observation de son éventuelle présence) dans les Champs de Fontenay à la limite avec le Clos Berry, c'est à 350 cm de profondeur que l'argile bariolée apparaît sous l'argile jaune (annexe 2, BCF1).

Parmi les prélèvements argileux de surface, BDC, recueilli dans le bois traversé par le ruisseau, possède une composition marginale par rapport aux échantillons de la Queue de l'Étang, avec moins d'aluminium, mais autant de fer (près de 9,4 %). La seule différence par rapport à BQE ou BCF1 repose essentiellement sur les proportions en silice et en alumine. En revanche, A10-P19, provenant du curage de l'étang à proximité du Clos Berry, possède une composition très similaire à celles des échantillons des carottes BCF1 et BQE, en particulier BQE-338 et BQE-467 (tableau 2).

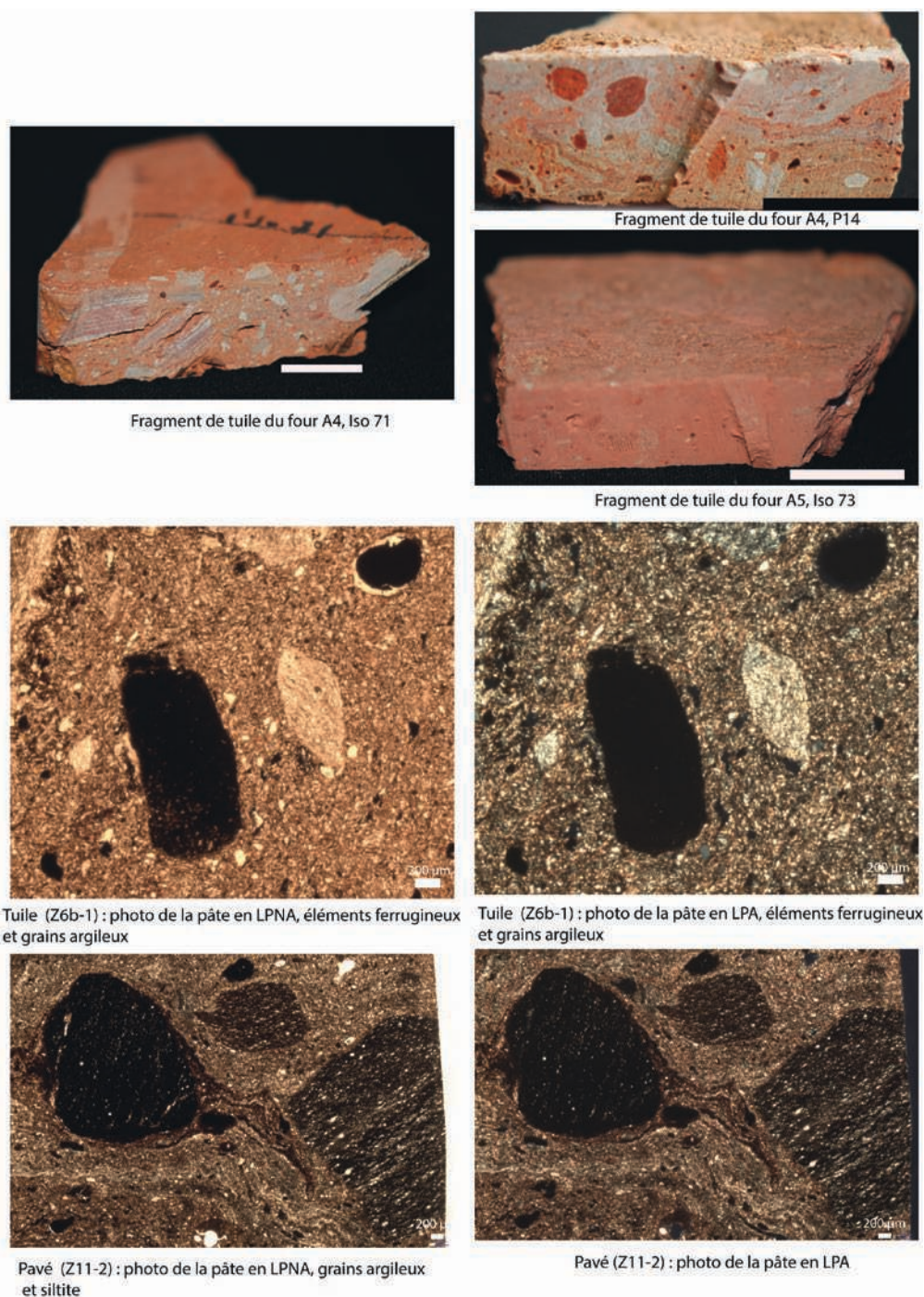
2.2. Caractérisation des terres cuites architecturales

Quinze échantillons de terres cuites architecturales (tuiles, cales d'enfournement, briques et pavés) ont été sélectionnés parmi le matériel recueilli au cours de la prospection de surface menée en 2016. À cette série ont été ajoutées treize tuiles provenant des parois du four A4, huit tuiles du four A5, six briques de A10 et une brique de A3. Ces échantillons ont

Figure 5 : Fraction fine et inclusions non plastiques de quelques échantillons de TCA représentatifs de la production : photographies macroscopiques et au microscope en lumière polarisée non analysée (LPNA) et en lumière polarisée analysée (LPA).

Figure 5: Fine fraction and non-plastic inclusions of some representative terracotta samples of the production: macroscopic and microscopic photographs in unanalyzed polarized light (LPNA) and in analyzed polarized light (LPA).

cl. Craham



fait l'objet d'analyses par ICP-AES et des lames minces ont été réalisées sur les quinze échantillons de TCA de la prospection de 2016.

À l'œil nu, les pâtes, de couleur rouge-orangé, parfois beige, certaines douces au toucher, sont de texture fine à grossière, avec des inclusions de couleur blanche, gris-noir ou rouge, pour certaines litées. La taille de ces inclusions est variable de 0,5 à 5 mm, voire plus (figure 5). Ces inclusions

de forme irrégulière sont des fragments de lithoclastes ou d'argilite, ou encore de siltite. Les inclusions rouges, riches en oxyde de fer, sont souvent de forme arrondie. Dans certaines terres cuites, des lits d'argile blanche alternent avec des lits rouge orangé.

Ces terres cuites constituent un groupe pétrographique très homogène, tant par le cortège minéralogique que par la taille et la fréquence des inclusions, même si celles-ci sont

		Moyenne n = 43	Ecart type	Ecart type relatif (%)
SiO ₂	% poids oxyde	53,44	1,71	3,2
Al ₂ O ₃		30,09	1,31	4,3
Fe ₂ O ₃		11,04	1,56	14,1
TiO ₂		1,11	0,06	5,7
CaO		0,57	0,15	26,8
MgO		0,56	0,06	10,2
Na ₂ O		0,46	0,08	18,6
K ₂ O		2,70	0,23	8,6
MnO		0,02	0,02	67,2
P ₂ O ₅			0,19	0,08
PF %		1,27	0,91	71,8
Ba	ppm	502	132	26
Sr		548	131	24
V		502	160	32
Zr		124	29	24
Rb		164	29	18
Y		37	10	26
Zn		142	75	53
Cr		163	47	29
Ce		87 (n=27)	22	25

Tableau 3 : Composition chimique moyenne des terres cuites architecturales de Barbery obtenue par ICP-AES.

Table 3: Average chemical composition of Barbery's architectural terracotta obtained by ICP-AES.

Source : Craham

mal classées (figure 5). La pâte se caractérise par une matrice fine, peu poreuse, contenant de nombreux minéraux subsphériques, et d'autres allongés, dont la fréquence est de 10 % et la taille ne dépasse pas 75 µm. Parmi les grains grossiers les plus fréquents (5-10 %), la pâte contient des éléments ferrugineux de forme suballongée à subanguleuse, dont la taille peut atteindre 5 mm. La fraction grossière compte également des quartz subsphériques et subarrondis d'environ 550 µm et des grains lités (argilite ou siltite?) pouvant atteindre 3,5 mm de longueur, avec une fréquence de l'ordre de 2 à 5 %. Ces inclusions sont associées à quelques silex subanguleux (taille inférieure à 5 mm) et grains siliceux microcristallins (siltite?) ne dépassant pas 700 µm. Par ailleurs, de petites oolithes ferrugineuses ont été observées uniquement dans la lame de la tuile n° 15 (tuile Z11-2). Il convient enfin de signaler dans la pâte de ces terres cuites la présence de rares grains de muscovite suballongés de 300 µm et quelques grumeaux

d'argilite de forme similaire mais de taille plus importante (max 1400 µm). Le carreau de pavement Z14-1 possède une fraction fine composée de nombreux grains de quartz subanguleux et suballongés ne dépassant pas les 350 µm. La biotite a également été identifiée. Les tuiles Z1-4 et Z14-3 se distinguent par leur fraction grossière plus importante (environ 30 %).

La composition chimique de la production de TCA²⁷ est également très homogène (tableau 3 et annexe 4). Des proportions très élevées en aluminium (30 % en moyenne) et en fer (11 % en moyenne) ont été enregistrées. Les écarts types relatifs ne sont pas très élevés, excepté pour quelques éléments comme les oxydes de fer, de calcium et de manganèse, le strontium ou le baryum. Les briques de A10 présentent une plus grande dispersion des teneurs en oxyde de fer où elles peuvent atteindre 15 %, mais sans grand changement dans les proportions des autres constituants. Aucune différence importante n'a été constatée entre les tuiles prélevées sur les structures en place des fours A4 et A5 ni avec les briques de A10 par rapport aux différentes TCA issues du ramassage de surface réalisé en 2016.

3. DES ARGILES ADAPTÉES À DIFFÉRENTS USAGES ?

3.1. Une argile pour les TCA

Les matériaux argileux de l'environnement immédiat des tuileries de Barbery présentent une grande diversité des compositions en fonction des secteurs de prélèvement et des profondeurs.

Les caractéristiques physiques et chimiques des matières argileuses auront une influence sur le façonnage (plasticité, malléabilité ou « ouvrabilité »²⁸), le retrait au séchage, la cuisson, les propriétés mécaniques (densité, porosité, résistance au gel et aux intempéries par exemple) et la couleur²⁹ de la terre cuite. La distribution de la taille des grains de la matière première argileuse et la composition ont donc une importance primordiale sur les propriétés techniques des TCA. C'est la raison pour laquelle les analyses géomécaniques et géochimiques ont été indispensables pour identifier les matériaux pouvant être utiles à la production de la terre cuite.

Pour distinguer parmi les différents prélèvements étudiés ceux qui seraient exploitables pour l'industrie tuilière, nous avons mobilisé les connaissances des industriels allemands.

27. Les cales d'enfournement sont façonnées avec la même pâte que les TCA.

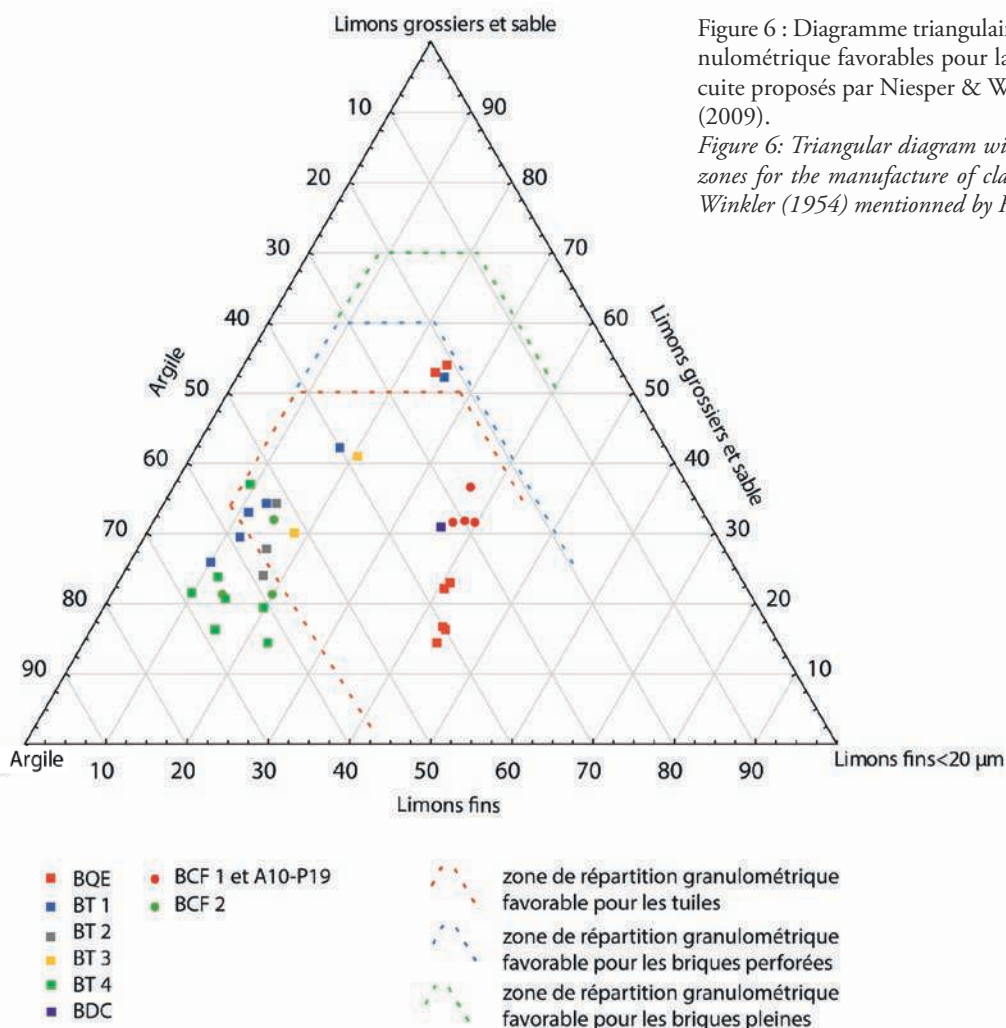
28. Ouvrable : [En parlant de matériaux], qui peut être façonné, d'après <http://www.cnrtl.fr/definition/ouvrable>.

29. La couleur de la terre cuite est un paramètre important pour l'architecte au même titre que les propriétés mécaniques.

Ceux-ci (Niesper et Winkler [1954] cité par Kornmann 2009) ont proposé pour la production de terres cuites architecturales allemandes un diagramme triangulaire reportant les domaines de distribution granulométrique optimaux pour leur façonnage (figure 6). D'après ce diagramme, le façonnage d'une tuile demande entre 20 et 50 % d'éléments fins ($< 2 \mu\text{m}$) : plusieurs échantillons sont donc potentiellement utilisables par les tuiliers de Barbery : BT 1, BT2, BT 3, BQE et BCF2. En revanche, les sédiments recueillis dans la carotte BT4 et BCF2 (excepté BT4-112 et BCF2-320) ainsi que BT 1-354 et BT 1-396 sont trop riches en éléments fins (pourcentage supérieur à 50 %) et auraient une plasticité excessive. Leur emploi pour la fabrication de terres cuites architecturales nécessiterait un fort taux d'humidité pour le façonnage, conduisant à un retrait important au séchage et à la cuisson, tout comme une difficile maîtrise du produit

fini. Les prélèvements de BQE et de BCF1 sont pratiquement tous dans la zone de répartition granulométrique favorable (excepté les deux échantillons de BQE- 50 et -83, BT1-120, plus sableux). La distribution granulométrique a aussi une influence sur la porosité du produit fabriqué. Quand un sol est monogranulaire (une seule taille de grains), la porosité est élevée. Les porosités les plus faibles sont observées vers 35 % d'argile en volume (Kornmann, 2009).

En ce qui concerne les caractéristiques de plasticité, la projection des valeurs de limite de plasticité en fonction de l'indice de plasticité dans le diagramme de Gippini (1969, d'après Kornmann 2009) montrent que les trois échantillons de la carotte BCF1 (à partir de 374 cm) sont dans le domaine des propriétés de mise en forme optimale pour le façonnage de tuiles (figure 7). B1, correspondant à l'assemblage d'échantillons de BQE (266 + 338 et 467), ainsi que le prélèvement



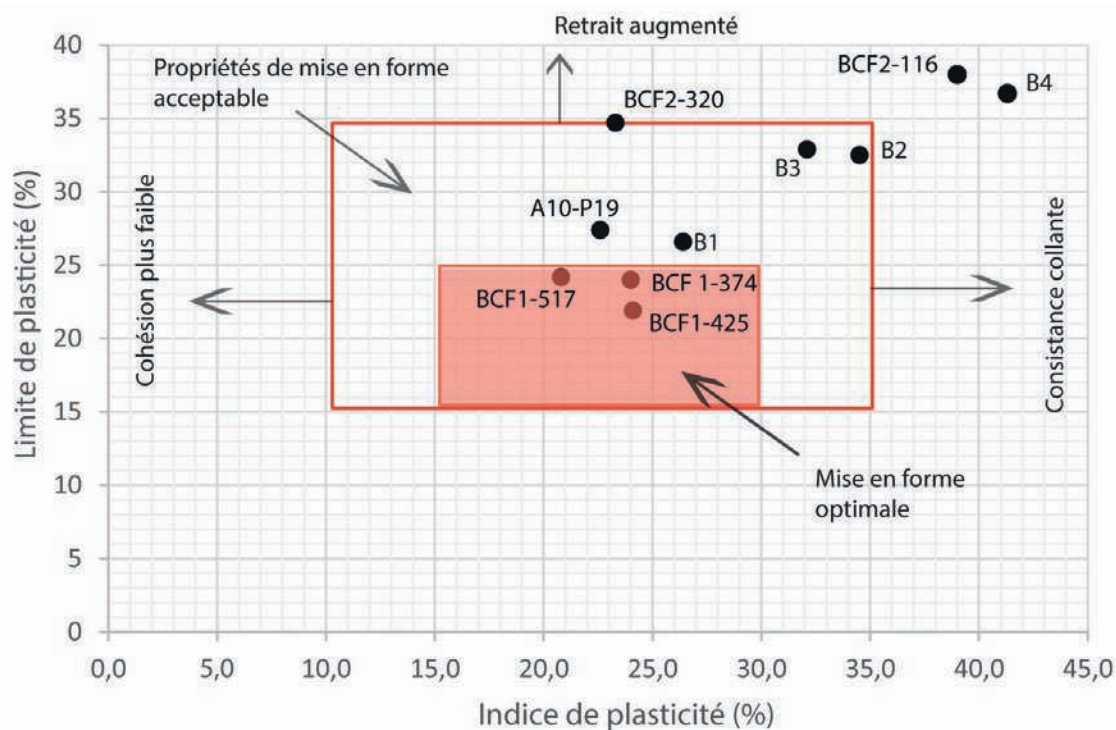


Figure 7 : Rapport de la limite de plasticité en fonction de l'indice de plasticité des échantillons argileux de Barbery. Les domaines de propriétés de mise en forme optimale et acceptable pour la terre cuite sont ceux proposés par Gippini (1969, d'après Kornmann, 2009).
 Figure 7: Ratio of plastic limit versus plasticity index for Barbery clay samples. The domains of optimal and acceptable forming properties are those proposed by Gippini (1969, according to Kornmann, 2009).

de surface A10-P19 sont à la limite de ce domaine. Ce constat s'applique également pour B2, B3 et BCF2-320 ; ces derniers se caractérisent par une mise en forme acceptable mais un risque de retrait important et une pâte à consistance collante. Le mode de façonnage des tuiles nécessitant le pressage dans des moules (en bois), une pâte trop collante ne permettra pas de bien maîtriser cette étape de la chaîne opératoire. Selon les travaux de Sigg (Sigg, 1991), B3 posséderait une meilleure résistance au gel que B1 et BCF1 car la fraction supérieure à 20 μm est plus significative dans ces échantillons. BCF2-116 et B4³⁰ sont à l'extérieur des deux domaines définis par Gippini (figure 7). Enfin, les sédiments de la carotte BT 4 (B4) seraient trop riches en éléments fins (la quantité d'argile étant supérieure à 60 %) et ont une plasticité excessive, nécessitant un fort taux d'humidité pour le façonnage conduisant à un retrait important au séchage (comme l'ont montré les essais empiriques) et à la cuisson et une difficile maîtrise des

30. La limite de liquidité la plus élevée pour cet échantillon poolé indique qu'il faudrait plus d'eau que les autres échantillons pour réaliser le moulage d'une tuile.

dimensions du produit fini³¹. Il est donc probable que les tuiliers n'aient pas utilisé ce type de matériau³².

Plusieurs sédiments sont donc potentiellement exploitables par les tuiliers (des sédiments des carottes BT1, BT2, BT3, BQE et BCF1).

Les TCA, quelle que soit leur couleur (beige ou rouge-orangé), possèdent une forte proportion en oxydes d'aluminium et de fer. Les caractéristiques chimique et pétrographique des TCA montrent que les seuls rapprochements possibles sont avec les sédiments des carottes BQE à la Queue de l'Étang et BCF1 dans les Champs de Fontenay à proximité du Clos Berry ou encore avec les prélèvements de surface A10-P19 et BDC. De plus, la confrontation des observations en lames minces des TCA et des différents matériaux

31. Ce matériau trop riche en argile (au sens granulométrique et minéralogique) constitue une pâte trop déformable pour permettre la manipulation de la forme.

32. Ce matériau pourrait éventuellement convenir en ajoutant une fraction d'inclusions non plastiques telles que du sable, du calcaire, des lithoclastes, des grains de terre cuite broyées afin de diminuer la plasticité et la distribution dans la classe des éléments fins. Cette expérimentation n'a pas été testée dans le cadre de cette étude.

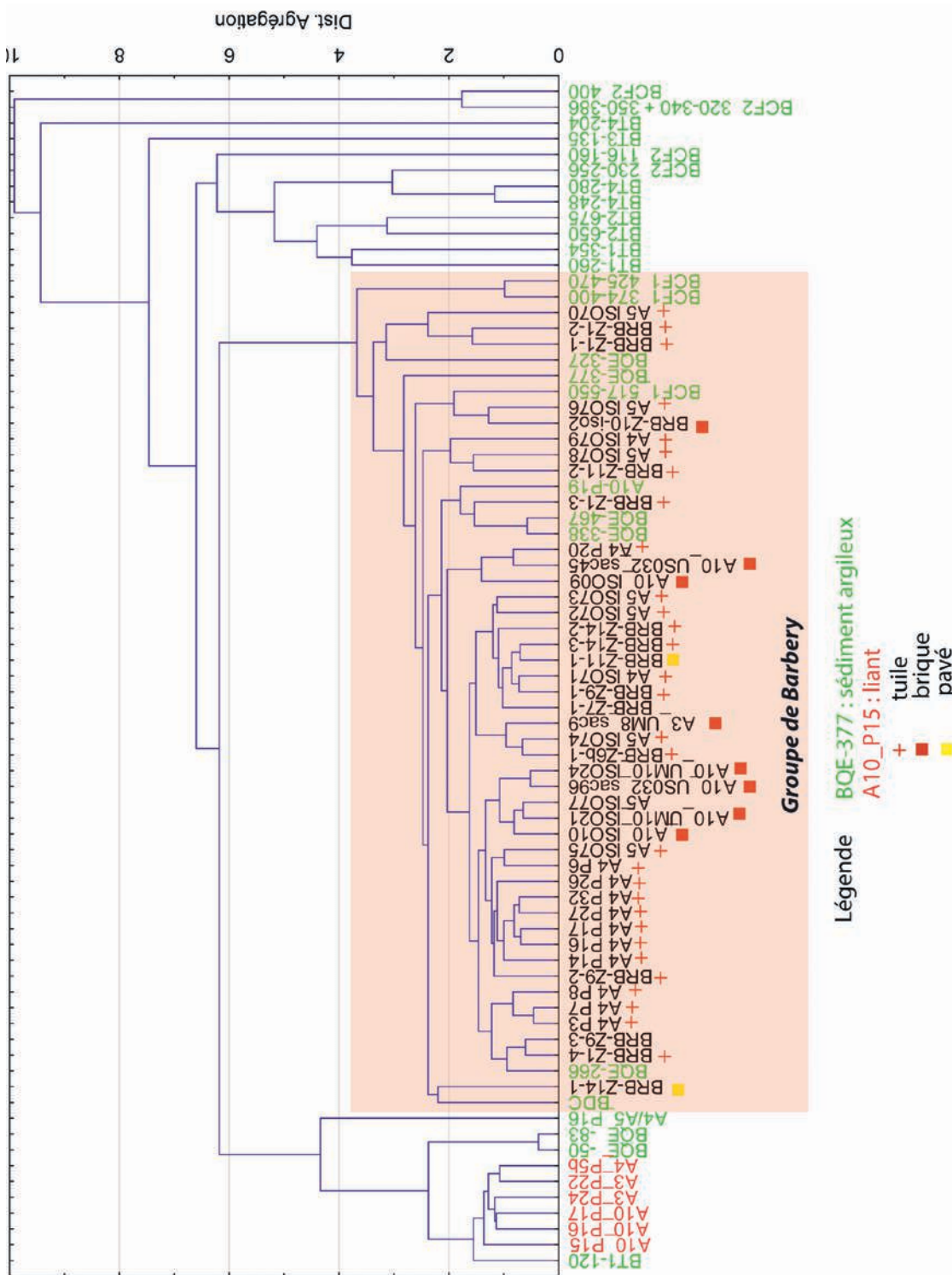


Figure 8 : Classification ascendante hiérarchique en affinité moyenne non pondérée sur des analyses chimiques normalisées et centrées réduites pour les échantillons de matière argileuse, des liants et des ICA. Les éléments suivants ont été utilisés : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO, et K₂O, Ba, Sr, V, Zr et Y.

Figure 8: Unweighted mean affinity hierarchical ascending classification on standardized and reduced centered chemical analyses for clay, cement and terracotta samples. The following elements were used: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO, and K₂O, MnO, Ba, Sr, V, Zr and Y.

Source : Graham

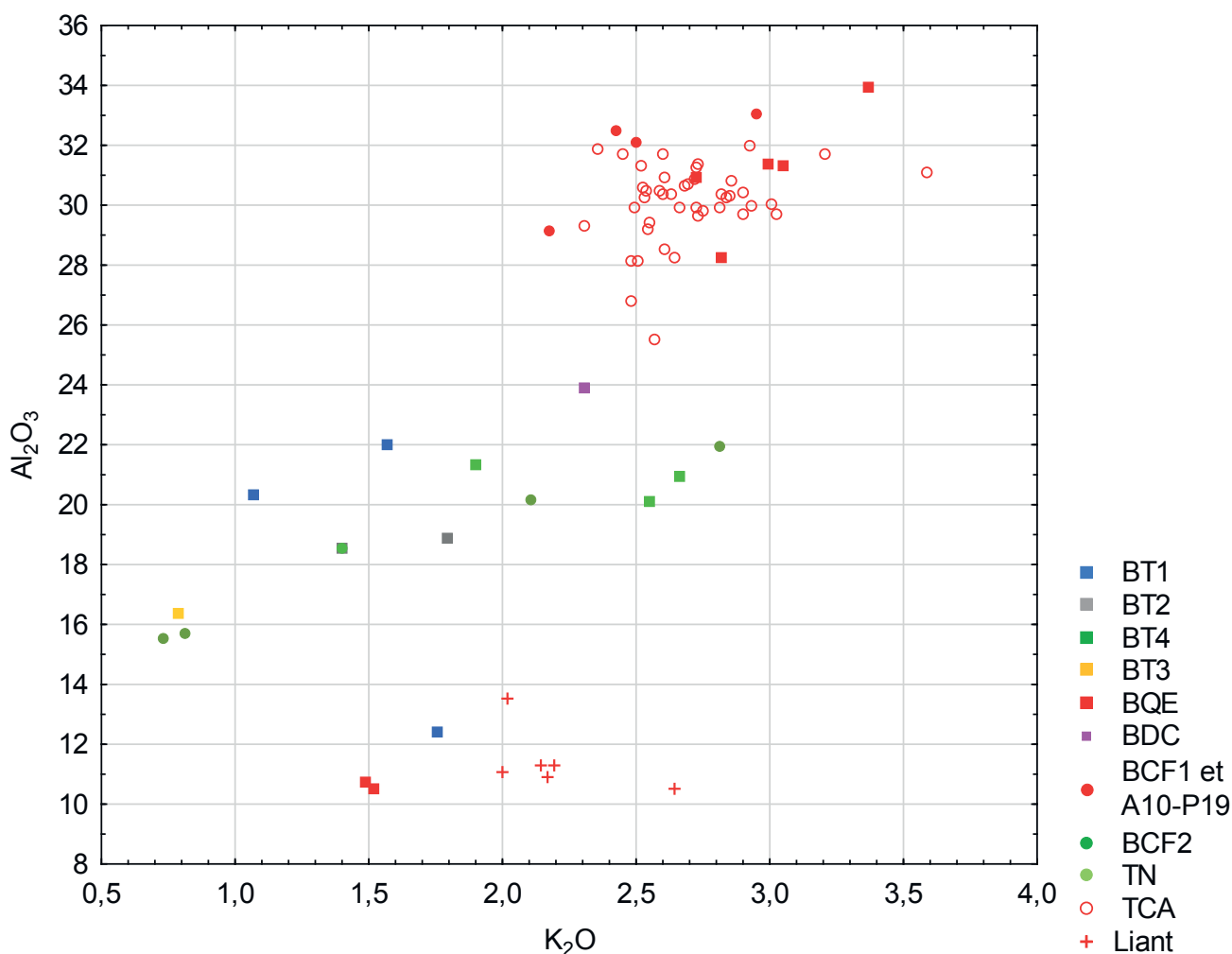


Figure 9 : Diagramme binaire de l'oxyde d'aluminium en fonction de l'oxyde de potassium de tous les échantillons de matière argileuse, des liants et des TCA (% poids oxyde).

Figure 9: Binary diagram of aluminium oxide versus potassium oxide of all clay samples, cements and terracotta samples (% oxide weight).

argileux disponibles permet de déduire que l'argile bariolée a vraisemblablement été utilisée en terre franche. Le diagramme binaire et l'analyse multivariée illustrent également cette correspondance (figure 8 et 9). Ces similitudes ont été confirmées par les caractéristiques minéralogiques (présence de lithoclastes ou de grains argileux, grains lités (siltite) ainsi que des éléments ferrugineux de forme suballongée à subanguleuse de taille grossière et peu d'inclusions de quartz). Des inclusions blanches du fragment de tuile Z11-2 et du pavé Z7-1 ont été analysées par DRX³³ (figure 4). La pyrophyllite

33. Cf. note 25. Dans l'échantillon Z7-1, la mullite a été identifiée en plus de la pyrophyllite dont les pics sont décalés par rapport aux échantillons argileux. La présence de la mullite témoigne d'une cuisson du pavé à une température plus haute que pour l'autre échantillon analysé, Z11-2 (où ce minéral est absent). Bien que différents travaux sur les argiles conte-

a été identifiée comme dans les argiles de la Queue de l'Étang. Elle peut être associée à une teneur élevée en aluminium ; ce minéral de la famille du talc confère à certains échantillons un toucher très doux et « gras », selon l'état de cuisson. En revanche, le cortège minéralogique et la fraction grossière (grains de silex ou d'oolithes ferrugineuses par exemple) des échantillons des carottes BT1, 2, 3 et 4 n'ont pas été observés

nant de la pyrophyllite présentent les transformations des minéraux au cours de la cuisson, il est délicat dans le cas de cet échantillon de proposer une température de cuisson. Dans une argile riche en kaolinite et en pyrophyllite, la mullite apparaît sur le diffractogramme dès 1000 °C (Erdemoğlu *et al.*, 2020, figure 5). Dans un kaolin, la mullite a été identifiée entre 1100 et 1150 °C (Castelein *et al.*, 2001, p. 2375) et la transformation est complète au-delà de 1200 °C (Ali *et al.*, 2021).

dans les TCA. De plus, les compositions chimiques de ces échantillons diffèrent sensiblement de celles des terres cuites.

L'argile de la Queue de l'Étang ou des Champs de Fontenay, riche en alumine, possède un faible coefficient de dilatation avec une bonne résistance aux chocs thermiques et une bonne stabilité mécanique. Les matériaux contenant de la pyrophyllite sont encore employés aujourd'hui dans de nombreux domaines industriels notamment pour leur caractère hydrophobe (Marteau, 1991 ; Boissinot *et al.*, 2004 ; Ali *et al.*, 2021). Les matériaux de la carotte BQE ne sont pas monominéraux, ils contiennent aussi de la kaolinite, des oxydes de fer, de l'illite et des inclusions non plastiques dans la fraction grossière telles que des quartz, de la glauconie, des grains siliceux monocristallins (siltite?), des grumeaux argileux et des minéraux jaunâtres de nature indéterminée. Ce matériau argileux possède donc des propriétés mécaniques, chimiques et granulométriques suffisantes pour le façonnage de terres cuites architecturales. On constate que les tuiles des fours A4, ou A5 ou encore A10 ayant fonctionné entre la fin du xiv^e et le xvii^e siècle (Bocquet-Liénard *et al.*, 2018a ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2020 ; Bocquet-Liénard *et al.*, 2022) sont de texture et de composition similaires témoignant d'une continuité dans la sélection et la disponibilité de la ressource argileuse³⁴.

3.2. Une argile comme liant pour la construction des fours ?

Grâce à toutes les analyses des matériaux argileux, il a aussi été possible d'aborder la question du type d'argile employée pour la construction des structures de cuisson. Six échantillons de liants argileux de couleur rouge-orangé, dont trois provenant du four A10, deux du four A3 et un du four A4, ainsi qu'un prélèvement d'argile jaune à l'extérieur de la fosse d'installation du four A4 (TN) ont été analysés (tableau 2). Ces six échantillons de sédiments argileux intercalés entre les tuiles des murs des fours (constitués de lits de tuiles, de briques et de pavés) sont chimiquement très proches et riches en silice (entre 74 et 78 %). Les pourcentages d'alumine (entre 11 et 13 %) et d'oxyde de fer (entre 4,7 et 6,9 %) y sont faibles (tableau 2). L'échantillon d'argile jaune prélevée dans le substrat naturel remanié du four A4 (A4/A5-P16) est riche en fer (15 %) et contient moins de silice et plus d'alumine que les liants analysés. Les compositions de ces liants sont similaires aux limons sablo-argileux jaunes récoltés dans BT1 à 120 cm de profondeur ou à l'argile jaune de surface de BQE-50 ou

BQE-83. L'observation en lame mince de BT1-120³⁵ ou BQE-83 les a classées dans les argiles siliceuses. D'un point de vue chimique, l'alumine de BT1-120 ou BQE-83 est, comme dans les liants, en faible quantité (12 à 16 %). Le fer varie entre 6 et 9 %, en proportion suffisamment élevée pour fournir la couleur orangée lors d'une cuisson entre 500 et 900 °C. L'élément dominant est la silice (entre 71 et 76 %) caractéristique des sédiments sableux.

L'hypothèse proposée à partir de ces analyses est que les constructeurs des fours ont utilisé préférentiellement les argiles de surface de couleur jaune (provenant des niveaux au-dessus de l'argile bariolée ou extraites à de faibles profondeurs comme l'argile jaune de BT1 et éventuellement BT3). L'argile jaune est un type d'argile considérée comme « *bonne pour servir à la batisse des fourneaux* », et mentionnée dans la liste des matières premières employées par les fabricants de faïences au xviii^e siècle (La Hubaudière [de], 2007).

CONCLUSION

Parmi plusieurs terres argileuses disponibles, les tuiliers ont choisi l'argile bariolée pour le façonnage des TCA, une argile encore présente aujourd'hui à partir de 266 cm de profondeur au lieu-dit anciennement appelé Queue de l'Étang, ainsi que dans les Champs de Fontenay à partir de 374 cm de profondeur³⁶. Leur choix s'est porté sur une argile peu collante, fine et de cohésion suffisante pour une mise en forme optimale des tuiles façonnées par moulage, comme cela a pu être démontré dans le diagramme de Gippini (figure 7). Ce matériau offre un résultat après cuisson correspondant aux qualités recherchées, comme la résistance, la couleur rouge, une faible porosité et une bonne stabilité mécanique assurée par des grains de petite taille.

Ces analyses expliquent, en partie, le succès économique des tuiles de Barbery, succès dont nous pourrions montrer à l'avenir l'étendue à partir de l'étude des diffusions, rendue maintenant possible grâce à ce référentiel. Il s'explique aussi certainement par les capacités d'accès au combustible, en l'occurrence le bois de la forêt de Cinglais située à proximité. Mais il est encore possible qu'interviennent tout autant des modes

35. Nous n'avons pas réalisé d'observation en lame mince pour BT3-135.

36. L'approche archéométrique réalisée dans le cadre de l'étude de la production des TCA par les cisterciens de Morimond (Haute-Marne) a montré également la filiation entre les TCA utilisées pour couvrir les bâtiments de l'abbaye et une terre en particulier (argiles de Levallois). L'installation d'une tuilerie monastique répond aux besoins des chantiers de (re)constructions des bâtiments de l'abbaye (Rouzeau *et al.*, 2011, p. 177-180).

34. Louis-Amédée Léchaudé d'Anisy, au début du xix^e siècle, indique quelle argile est utilisée, lorsqu'il estime que « l'abbaye de Barbery faisait exploiter, probablement depuis son origine, une terre argilleuse violacée », BNF, fr. 14543.

d'exploitation sur lesquels nous renseigne une riche documentation écrite³⁷ qui devra faire l'objet d'un autre article.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent aux propriétaires des différentes parcelles du terrain où les prélèvements ont été réalisés ainsi qu'aux bénévoles des campagnes des opérations successives menées depuis 2016. Ce projet pluridisciplinaire n'aurait pas vu le jour sans le soutien du ministère de la Culture, le département du Calvados et la mairie de Barbery. Les lames minces et leur étude ont été réalisées en collaboration avec le service archéologie du département du Calvados. Nous remercions également vivement nos collègues Nadia Cantin et Virginie Moineau du laboratoire Archéosciences de Bordeaux d'avoir passé du temps à identifier les différentes phases argileuses par diffraction-X dans plusieurs prélèvements de sédiments argileux et les échantillons de terre cuite architecturale. Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements aux relecteurs dont les conseils et remarques ont permis d'enrichir cette contribution.

Bibliographie

- Ali, M. A., Ahmed, H. A. M., Ahmed, H. M., Hefni, M., 2021. Pyrophyllite: An Economic Mineral for Different Industrial Applications. *Applied Sciences*, 11, (23) : 11357. <https://doi.org/10.3390/app112311357>.
- Allinne, C., Léon, G. (dir.), 2015. PCR Arbanos : l'Antiquité en Basse-Normandie. 5^e année. SRA Normandie, Caen.
- Antoine, P., Rousseau, D.-D., Fuchs, M., Hatté, C., Gauthier, C., Marković, S. B., Jovanović, M., Gaudenyi, T., Moine, O., Rossignol, J., 2009. High-resolution record of the last climatic cycle in the southern Carpathian Basin (Surduk, Vojvodina, Serbia). *Quaternary International*, 198, (1) : 19-36. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.008>.
- Bocquet-Liénard, A., Dubois, A., Le Quellec, V., Vincent, J.-B., Lautridou, J., Leclerc, M., Rohée, P., Tickner, L., 2022. Artisanat et industrie du feu à Barbery, bas-fourneaux de l'âge du Fer et tuileries médiévales et modernes. Opération 2021. SRA Normandie, Caen.
- Bocquet-Liénard, A., Dubois, A., Vincent, J.-B., 2018a. Les tuileries médiévales et modernes de Barbery. Opération 2017. SRA Normandie, Caen.
- Bocquet-Liénard, A., Dubois, A., Vincent, J.-B., 2020. Les tuileries médiévales et modernes de Barbery. Opération 2019. SRA Normandie, Caen.
- Bocquet-Liénard, A., Dubois, A., Vincent, J.-B., Leclerc, M., Le Quellec, V., Tickner, L., 2021. Tuileries médiévales et modernes et bas-fourneaux de l'âge du fer à Barbery. Opération 2020. SRA Normandie, Caen.
- Bocquet-Liénard, A., Leclerc, M., Dubois, A., Vincent, J.-B., Bataillé, M.-P., Thierry, M.-A., Maquaire, O., Savary, X., 2018b. Les tuileries médiévales et modernes de Barbery. SRA Normandie, Caen.
- Bocquet-Liénard, A., Vincent, J.-B., Davidson, R., Dubois, A., Hulin, G., 2017. Les tuileries médiévales et modernes de Barbery. Rapport de prospections thématiques 2016. SRA Normandie, Caen.
- Boissinot, P., Langlois, P., Padua, A., 2004. *Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions*. Publications de l'Université de Saint-Étienne, Saint-Étienne.
- Castelein, O., Guinebrière, R., Bonnet, J. P., Blanchart, P., 2001. Shape, size and composition of mullite nanocrystals from a rapidly sintered kaolin. *Journal of European Ceramic Society*, 21, (13) : 2369-2376.
- D'Anna, A., Desbat, A., Garcia, D., Schmitt, A., Verhaeghe, F., 2003. *La céramique : la poterie, du Néolithique aux Temps modernes*. Coll. « Archéologiques », Errance, Paris.
- Deer, W. A., Howier, R. A., Zussman, J., 1992, *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Second edition, Longman Scientific & Technical, Essex England.
- Deroin, J.P., Lerouge, G., Barbier, G., Vernhet, Y., Coutard, J.P., Ozouf, J.C., Langevin, C. 1999. *Notice explicative de la feuille de Mézidon à 1/50 000*. Service géologique national. BRGM, Orléans.
- Dubois, A., Vincent, J.-B., 2015. L'abbaye cistercienne de Barbery (Calvados) : liste abbatiale et restitution du bâti. *Annales de Normandie*, 65^e année, 1 : 39-152.
- Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T., 2020. Thermal Behavior of Pyrophyllite Ore during Calcination for Thermal Activation for Aluminum Extraction by Acid Leaching. *Clays and Clay Minerals*, 68 : 89-99.
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 : 3-26.
- Gigot, P., Dupret, L., Le Gall, J., 1999. *Notice explicative de la feuille de Falaise à 1/50 000*. Service géologique national. BRGM, Orléans.
- Gippini, E., 1969. Contribution à l'étude des propriétés de moulage des céramiques et des mélanges optimaux. *L'industrie céramique*, 619 : 423-435.

37. Les premiers éléments du mode d'exploitation et de la géographie des tuileries ont été présentés dans le rapport du projet de recherche de l'opération de 2017 (Bocquet *et al.*, 2018a).

- Konert, M., Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain-size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44 : 523-535.
- Kornmann, M., 2009. Matériaux de terre cuite – Matières de base et fabrication. *Techniques de l'ingénieur*, C905 V2 : 20.
- La Hubaudière (de), C., 2007. *L'art de la fayence des Caussy : faïenciers à Rouen et Quimper aux XVIII^e siècle*. Lilou, Falaise.
- Leach, B., 2003. *Le Livre du potier*. Revue de la Céramique et du Verre, Vendin-le-Vieil.
- Mako, A., Toth, G., Weynants, M., Rajakai, K., Hermann, T., Toth B., 2017. Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values. *European Journal of Soil Science*, 68 : 769-782.
- Marteau, P., 1991. *Mémento roches et minéraux industriels*. Talc. R 32887 Geo SGN 91. Service géologique national. BRGM, Orléans.
- Matthew, A.-J., Woods A.-J., Oliver C., 1991. Spots before the eyes: new comparison charts for visual percentage estimation in archaeological material. In A. Middleton, I. Freestone (dir.). *Recent Developments in Ceramic Petrology*. British Museum Occasional Papers, Londres, 81, 211-263.
- Ramaswamy, V., Rao, P. S., 2006. Grain Size Analysis of Sediments from the Northern Andaman Sea: Comparison of Laser Diffraction and Sieve-Pipette Techniques. *Journal of Coastal Research*, 22, (4) : 1000-1009.
- Rekk, S., 2014. Méthodologie et essai de constitution de terroirs géochimiques : application aux céramiques communes d'ateliers du Nord de la Gaule. Thèse de doctorat, FUNDP, Namur.
- Richer de Forges, A., Feller, C., Jamagne, M., Arrouays, D., 2008. Perdus dans le triangle des textures. *Etude et gestion des sols*, 15, (2) : 97-111.
- Rouzeau, B., Moulis, C., Vue, B., Desforges, A., Bocquet-Liénard, A., 2011. Production et emploi de l'argile par les cisterciens de l'abbaye de Morimond (Haute-Marne). Bilan provisoire de la recherche et des protocoles d'étude. In A. Bocquet-Liénard, B. Fajal (dir.). *À propo[ts] de l'usage, de la production et de la circulation des terres cuites dans l'Europe du Nord-Ouest autour des XIV^e-XVI^e siècles*. Publications du Craham, Caen, 167-182.
- Sigg, J., 1991. *Les produits de terre cuite : matières premières, fabrication, caractéristiques, applications*. Septima, Paris, France.
- Thorez, J., 2003. L'argile, minéral pluriel. *Bulletin de la Société royale des sciences de Liège* [En ligne], 72, (1) : 19-70. <https://popups.uliege.be/0037-9565/index.php?id=889>.
- Van Ossel, P., Brunet-Villatte, F., Ciezar, P., Coste, M.-C., Gitta, C., Gonzalez, V., Marcille, C., Navetch-Domin, A., Pieters, M., Ravoire, F., Rodet-Belarbi, I., Trombetta, P.-J., Leonelli, M.-C., Dufay, B., Faucherre, N., Guillaume, J., Goudineau, C., 1998. *Les jardins du Carrousel (Paris). De la campagne à la ville : la formation d'un espace urbain*. Maison des sciences de l'homme, Paris.
- Vaultier, F., 1836. *Recherches historiques sur l'ancien pays de Cinglais, au diocèse de Bayeux*. Hardel, Caen.
- Vérague, J., 1977. Les altérations des roches du socle armoricain : relicttes morpho-climatiques de la continentalisation post-hercynienne entre Sées et Alençon (Basse-Normandie). *Noroiis*, 94 : 251-269.

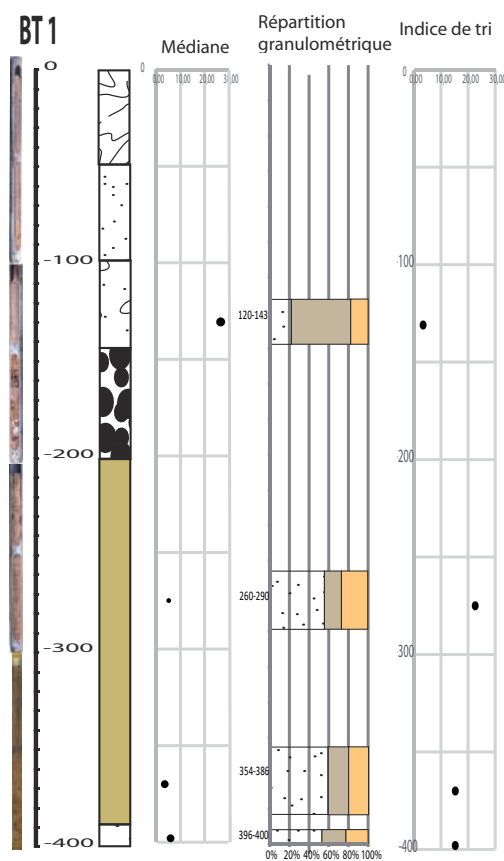
ANNEXES

Annexe 1 (ci-contre) : Description lithologique des prélèvements des carottes.

Appendix 1: Lithological description of core samplings.

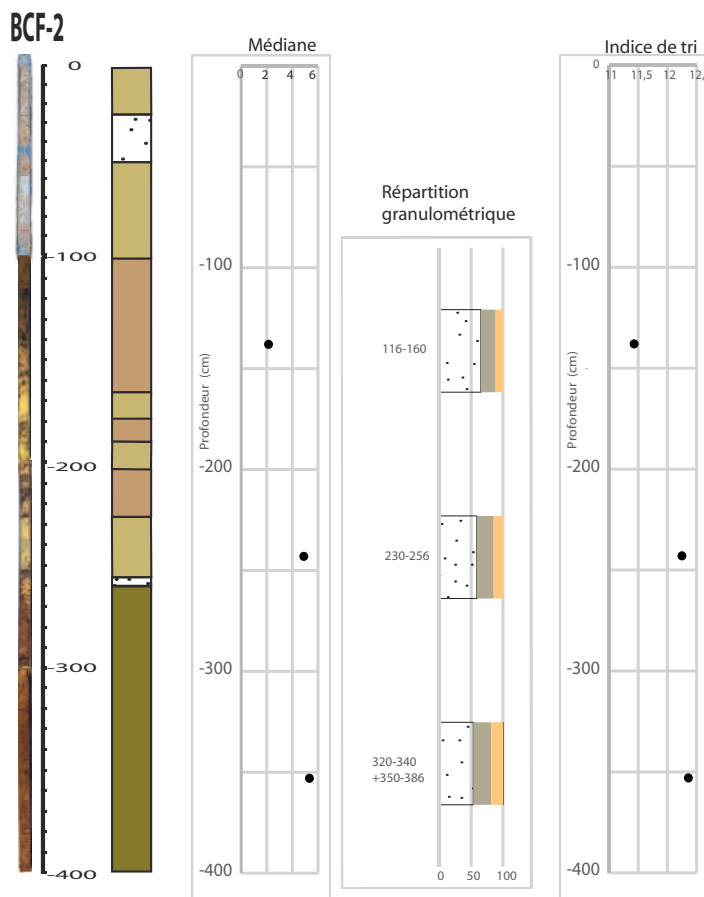
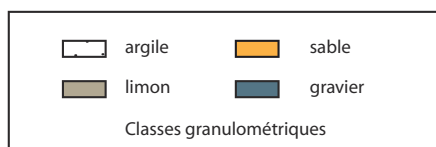
Sondage	Nom de l'éch.	Descriptif	Ech. regroupés pour l'indice de liquidité
BT1 Carotte ouverte	BT1 120-143	limon sableux, brun-jaune, très fin, légère réaction HCl 10 %	
	BT1 260-290	argile limoneuse contenant fragments de roches usés mais pas vraiment arrondis (silex, grains agglomérés et inclusions noires (matières organiques ou Mn ?), des cailloux de diamètre jusqu'à 5 cm)	
BT1 Carotte fermée	BT1 354-386	argile marron-jaune homogène fine, un peu plus sableuse, contient des inclusions noires, pas de refus > 2 mm	
	BT1 396-400	argile fine, jaune-marron très douce, aucun refus au tamisage > 2 mm, contient des nodules agrégés plus clairs, beige réagissent légèrement à l'HCl, une fois les nodules broyés, pas de refus.	
	BT1 396 nodules		
BT2 Carotte ouverte	BT2 650-675	argile limo-sableuse jaune, contient de très petits nodules blancs, et des inclusions noires (aucune réaction à l'HCl). Le refus au tamis > 2 mm est constitué de petits grains de silex et d'oxydes de fer noir.	B2
	BT2 675-690	argile limoneuse jaune fine, très similaire au niveau du dessus, ne contient pas de mobilier archéologique, le refus de tamisage > 2 mm contient des grains de grès, de silex issus de l'altération, il y a une très légère réaction à l'HCl. Le refus contient aussi des grains noirs (oxydes de fer ?).	
BT3 Carotte ouverte	BT3 135-165	limon argileux ou argile limoneuse marron-jaune, compacte, aucune particule >2mm, pas d'inclusions ou de grains grossiers apparents	B3
	BT3 165-175	argile très jaune, sableuse, compacte	
BT4 Carotte ouverte	BT4 70-90	argile sableuse jaune-marron, assez homogène compacte et dense, ne contient pas de grains visibles à la loupe, (x 8). Le refus au tamisage > 2 mm est composé de petits grains 0,2-0,5 m, qq gros grains plutôt arrondis, friables et tendres sous l'ongle, de couleur claire et d'autres plus durs arrondis (silex ou grès) bien roulés.	B4
	BT4 100-112	argile jaune, marbrée de blanc-gris, elle contient des inclusions blanches sableuses. Le refus au tamisage > 2 mm est peu abondant, il est composé d'inclusions blanches de forme très irrégulière (amas, agrégat) ne réagissant pas à l'HCl.	
	BT4 112-120	limon sableux jaune plus caillouteux que le niveau supérieur, le refus > 2 mm est faible, et composé de grains blancs tendres friables de forme irrégulière.	
	BT4 120-136	argile limoneuse marron-jaune. Le refus > 2 mm est peu abondant. Il est composé d'agrégats et de quatz blanc arrondis.	
BT4 Carotte fermée	BT4 204-220	argile jaune limoneuse fine	B4
	BT4 233-244	argile jaune limoneuse contient des inclusions blanches	
	BT4 248-268	zone argileuse limoneuse jaune avec inclusions blanches rares	
	BT4 280-290	argile limoneuse jaune, contient des inclusions blanches	

BCF1 374-400	argile bariolée grise et rouge, ressemble à l'argile de la Queue de l'Étang	
BCF1 425-470	argile bariolée violet/vert mais majoritairement claire	
BCF1 517-550	argile bariolée à dominante rouge	
BCF2 116-160	argile riche en inclusions noires, réparties de manière irrégulière	BCF2-116
BCF2 230-256	argile jaune compacte et fine	
BCF2 320-340 + 350-386	argile marron fine, contient des concrétions siliceuses	
BCF2 400	argile marron fine, contient des concrétions siliceuses	
BQE 50-83	limon argileux brun jaune, le refus > 2 mm contient des grès, du silex (4 cm), mais la majorité des grains sont petits 0,3-0,5 cm	
BQE 83-100	limon argileux brun très doux, avec passées jaunes. Le refus > 2 mm est peu important. Les grains sont des silex, des grains noirs (oxydes de fer?), et des grès de 0,2-0,5 cm, la surface des grains est usée mais les grains ne sont pas vraiment arrondis.	
BQE 266-300	argile rouge marbrée de violet avec des zones grises, très douce, aucun grain visible, qq grains ont été refusés au tamis > 2 mm mais ceux-ci sont tendres sous l'ongle	BI
BQE 327-338	argile violette dominante, contenant des zones plus dures et compactes (concentration d'oxydes de fer?), et des zones d'argile grise.	
BQE 338-377	argile rouge homogène, très douce, « savonneuse », pas de refus au tamis > 2 mm	BI
BQE 377-391	zone dans la carotte d'argile gris-blanc très fine, douce, aucun grain visible à la loupe, aucun refus au tamis > 2 mm	
BQE 467-492	argile rouge fine et douce, pas de refus au tamis > 2 mm	BI
A10-P19, curage étang Clos Berry	argile bariolée	
Bois douet de Corneville	argile rouge fine	
TN	argile jaune	

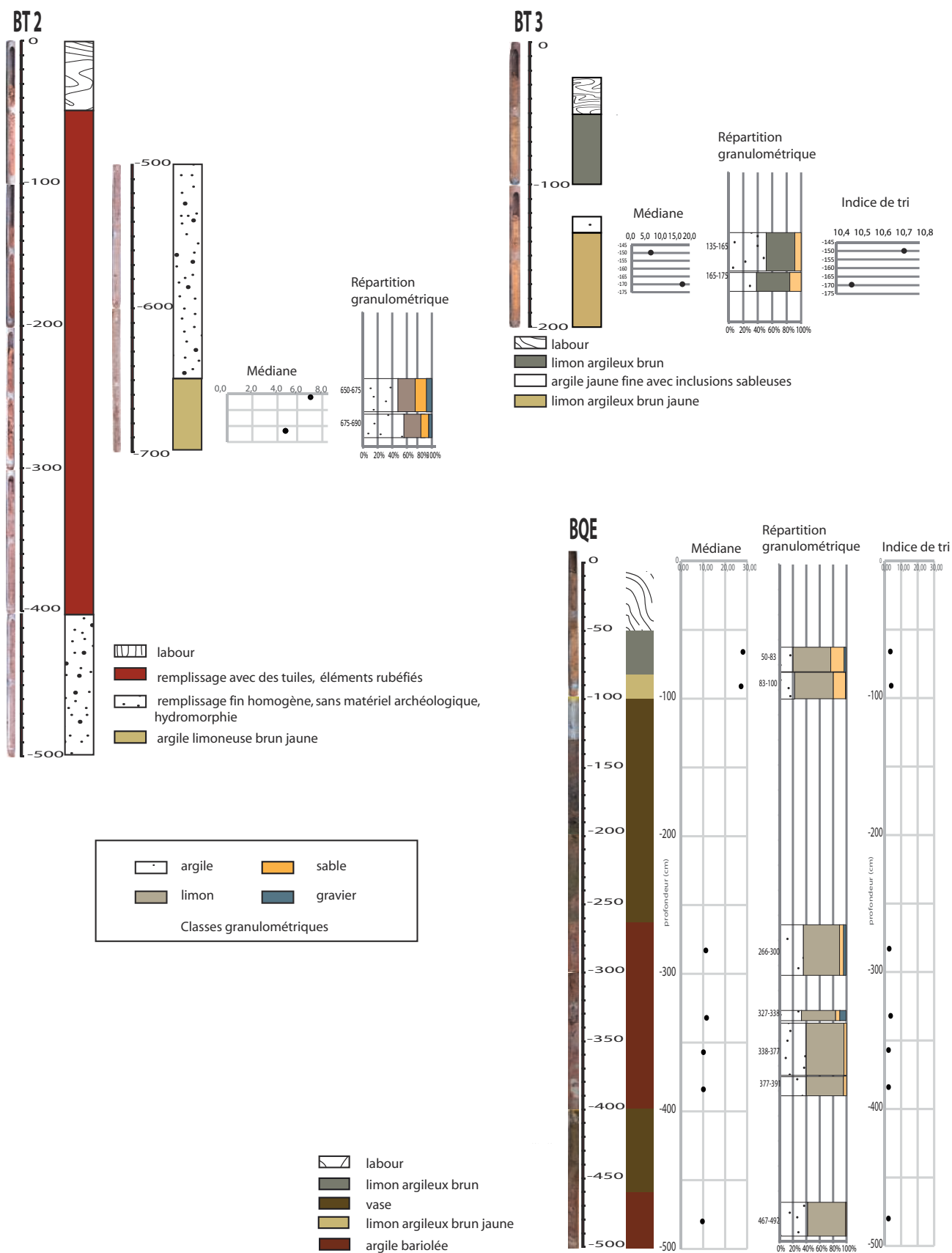


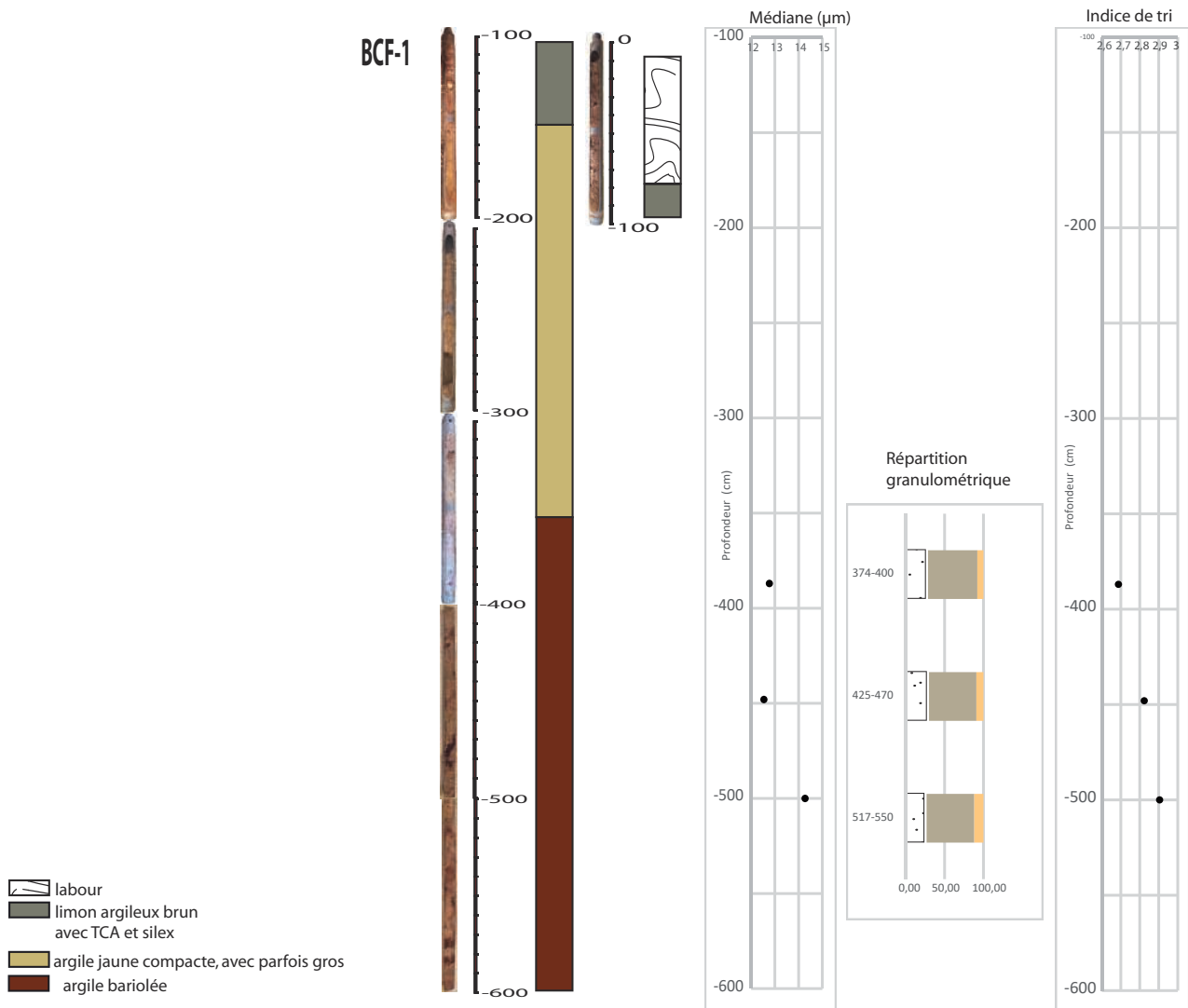
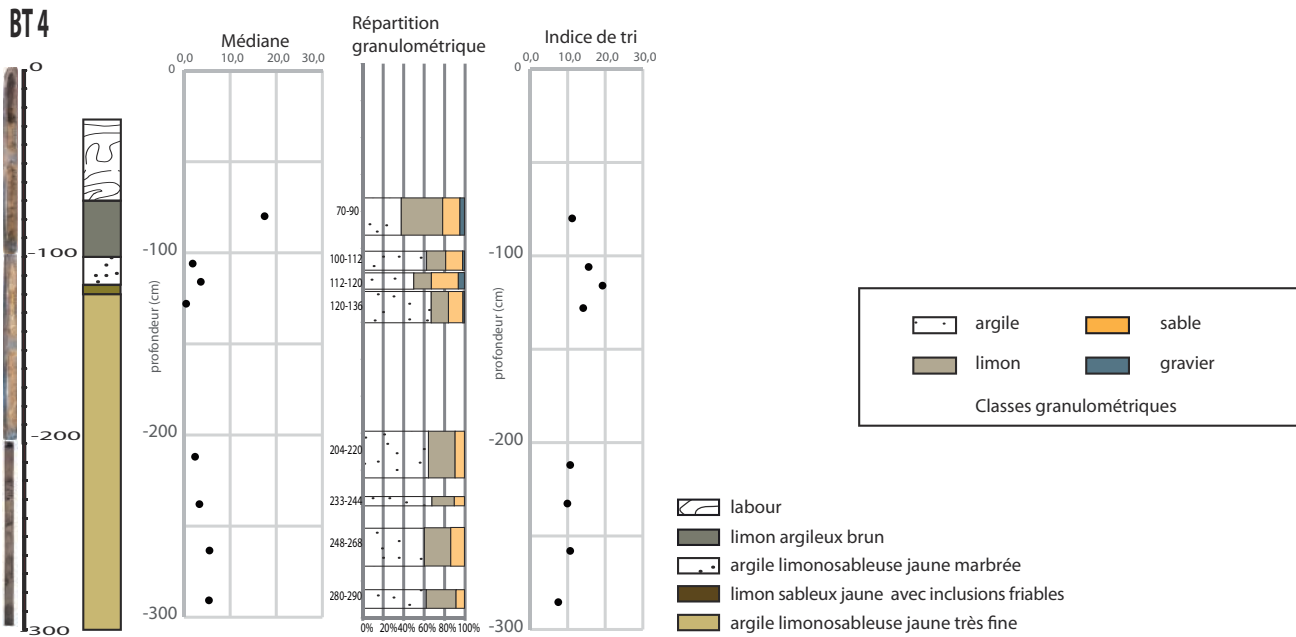
- labour
- limon brun-jaune
- limon sableux brun-jaune
- silex, oxyde de fer, grès dans une matrice de limon
- argile limoneuse brun jaune
- argile marron-jaune fine

Annexe 2 (p. 127-129) : Description lithologique et synthèse des analyses granulométriques laser des prélèvements des 7 carottes (BT1 à 4, BQE, BCF1 et BCF2).
 Appendix 2 (p. 127-129): Lithological description and synthesis of laser particle size analysis of the 7 core samplings (BT1-4, BQE, BCF1 and BCF2).



- argile limonosableuse jaune très fine et compacte
- limon sableux aune avec cailloutis
- argile jaune ponctuée de grains noirs
- argile marron avec concrétions siliceuses





Annexe 4 : Résultats détaillés des analyses chimiques par ICP-AES des terres cuites architecturales de Barbery. Les données sont normalisées à 100 % pour une perte au feu et l'oxyde de phosphore nuls (Craham).

Appendix 4: Results of chemical analyses by ICP-AES of the Barbery architectural terracotta. Data are normalized to 100% for zero loss on ignition and phosphorus oxide (Craham).

Analyse-Num	Contexte	Type	Pâte	% poids oxyde										ppm							Ce	
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Pf %	Ba	Sr	V	Zr	Rb	Y		Zn
BRB-Z1-1	Prospection	tuile	claire douce	53.21	31.39	9.90	1.12	0.63	0.53	0.41	2.73	0.08	0.14	1.88	908	544	572	124	145	35	86	147
BRB-Z1-2	Prospection	tuile	orange	53.23	31.28	10.01	1.14	0.55	0.59	0.45	2.72	0.02	0.20	1.14	1051	783	462	121	154	37	152	159
BRB-Z1-3	Prospection	tuile	orange	53.05	30.85	10.57	1.09	0.64	0.52	0.54	2.72	0.02	0.23	4.87	662	702	623	107	155	48	252	152
BRB-Z1-4	Prospection	tuile	orange-rouge	54.46	30.38	9.85	1.12	0.51	0.57	0.45	2.63	0.02	0.17	0.55	540	661	529	123	153	35	144	149
BRB-Z6b-1	Prospection	tuile	orange	52.29	31.99	9.89	1.10	0.55	0.69	0.56	2.92	0.01	0.13	1.36	557	513	467	108	168	34	278	259
BRB-Z7-1	Prospection	pavé	claire beige	53.69	30.34	10.54	1.18	0.47	0.54	0.39	2.85	0.02	0.17	1.03	565	521	366	114	148	36	65	160
BRB-Z9-1	Prospection	tuile	claire (beige)	54.24	30.72	9.71	1.19	0.42	0.62	0.40	2.69	0.02	0.12	1.20	482	583	322	125	131	41	145	159
BRB-Z9-2	Prospection	tuile	claire	52.13	30.96	11.60	1.08	0.59	0.53	0.50	2.61	0.01	0.18	1.02	473	703	729	121	137	33	121	147
BRB-Z9-3	Prospection	cale	orange	54.56	30.81	9.25	1.13	0.47	0.51	0.40	2.86	0.01	0.19	1.07	505	679	542	116	176	33	66	171
BRB-Z11-1	Prospection	pavé non glacuré	orange	53.23	30.48	10.97	1.13	0.52	0.62	0.43	2.59	0.02	0.18	1.15	471	455	356	120	155	63	244	208
BRB-Z11-2	Prospection	tuile	beige/grise	53.18	30.50	11.08	1.08	0.74	0.54	0.31	2.54	0.03	0.22	3.43	568	397	643	128	135	46	222	173
BRB-Z14-1	Prospection	pavé	très cuit	57.86	25.50	10.79	1.03	1.16	0.67	0.34	2.57	0.08	0.63	0.76	579	571	634	226	146	48	238	248
BRB-Z14-2	Prospection	tuile	claire douce	54.13	29.42	10.95	1.17	0.80	0.62	0.32	2.55	0.04	0.40	1.54	524	505	299	149	158	41	136	188
BRB-Z14-3	Prospection	tuile	orange	51.48	31.69	11.81	1.14	0.45	0.53	0.44	2.45	0.02	0.18	1.42	417	510	380	120	162	42	228	369
BRB-Z10-iso2	Prospection	brique	rouge-orange	58.57	26.80	9.36	1.23	0.45	0.62	0.48	2.48	0.01	0.17	0.96	467	435	185	152	174	39	129	143
A10_ISO10	Four A10	Brique	rouge-orange avec éléments grossiers	49.81	29.92	15.10	1.02	0.49	0.55	0.42	2.67	0.01	0.10	0.99	414	545	351	134	214	31	162	150
A10_ISO09	Four A10	Brique	rouge-orange, avec éléments grossiers	52.86	31.10	9.66	1.10	0.51	0.61	0.56	3.59	0.02	0.15	0.73	413	462	735	140	199	34	159	140
A10_US032_sac45	Four A10	Brique	rouge-orange, avec éléments grossiers	52.99	30.35	11.15	1.06	0.53	0.54	0.54	2.82	0.01	0.15	0.64	422	508	792	140	187	33	145	139
A10_US032_sac96	Four A10	Brique	rouge-orange, avec éléments grossiers	50.39	30.28	13.72	1.09	0.61	0.52	0.54	2.84	0.01	0.15	0.83	439	533	509	129	192	34	143	154

Analyse/Num	Contexte	Type	Pâte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	N ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	PF %	Ba	Sr	V	Zr	Rb	Y	Zn	Cr	Ce
				% poids oxyde													ppm						
A10 UM10_ISO24	Four A10	Brique	rouge-orangé, avec éléments grossiers	50,50	30,01	13,67	1,07	0,55	0,58	0,60	3,01	0,01	0,15	0,86	429	515	508	134	175	31	149	146	113
A10 UM10_ISO21	Four A10	Brique	rouge-orangé, avec éléments grossiers	50,45	29,91	14,55	1,03	0,60	0,53	0,43	2,49	0,01	0,14	1,05	403	479	462	136	166	33	172	151	115
A3 UM8_sac9	Four A10	Brique	rouge-orangé, avec éléments grossiers	53,98	29,69	10,14	1,08	0,87	0,68	0,51	3,02	0,03	0,20	0,90	540	477	445	149	213	74	150	154	103
A4 P3	Four A4	tuile	beige avec éléments grossiers	53,68	28,15	13,11	1,12	0,50	0,52	0,41	2,48	0,04	0,19	0,34	426	739	430	123	142	30	34	133	66
A4 P6	Four A4	tuile	beige orangé, avec éléments grossiers	53,27	31,90	9,90	1,18	0,40	0,50	0,49	2,35	0,01	0,14	0,99	395	613	467	107	139	29	73	132	65
A4 P7	Four A4	tuile	orange, avec éléments grossiers	52,85	28,15	13,93	1,17	0,47	0,52	0,38	2,50	0,03	0,18	0,51	410	743	375	124	149	28	28	131	60
A4 P8	Four A4	tuile	orange, avec éléments grossiers	52,99	29,22	12,84	1,12	0,35	0,53	0,40	2,54	0,02	0,17	0,10	413	773	570	123	164	27	11	294	63
A4 P14	Four A4	tuile	beige avec éléments grossiers	54,09	29,99	10,30	1,15	0,49	0,57	0,47	2,93	0,02	0,18	0,81	497	528	681	125	199	30	0	141	66
A4 P16	Four A4	tuile	orange	53,04	29,63	11,68	1,14	0,61	0,57	0,55	2,73	0,04	0,23	1,05	405	514	638	128	179	39	149	163	97
A4 P17	Four A4	tuile	beige avec éléments grossiers	52,90	30,26	11,63	1,09	0,53	0,52	0,50	2,53	0,03	0,21	1,01	406	591	600	116	181	32	93	140	79
A4 P20	Four A4	tuile	orange avec éléments grossiers	54,83	30,42	8,92	1,15	0,60	0,58	0,58	2,90	0,02	0,18	1,24	399	426	827	114	185	34	105	131	67
A4 P26	Four A4	tuile	beige orangé avec éléments grossiers	53,93	28,54	12,02	1,11	0,65	0,56	0,52	2,61	0,05	0,23	0,99	393	522	608	19	118	34	102	139	63
A4 P27	Four A4	tuile	beige orangé avec éléments grossiers	53,20	30,38	11,06	1,19	0,58	0,53	0,45	2,60	0,02	0,19	1,20	415	530	668	124	124	34	132	156	91
A4 P32	Four A4	tuile	beige	54,87	28,24	11,76	1,16	0,40	0,52	0,41	2,64	0,01	0,13	0,72	406	596	586	108	116	26	66	133	48
A4 ISO71	Four A4	tuile	orange avec éléments grossiers	54,14	30,67	9,68	1,19	0,56	0,56	0,50	2,68	0,01	0,15	1,33	459	527	297	97	142	23	4	134	53
A4 ISO79	Four A4	tuile	rouge	53,91	29,71	11,01	0,99	0,74	0,51	0,20	2,90	0,03	0,16	3,15	594	166	822	101	189	35	275	134	65
Moyenne A4 n=13				53,67	29,64	11,37	1,14	0,53	0,54	0,45	2,65	0,03		432	559	582	108	156	31	82	151	68	
Ecart type A4				0,70	1,14	1,44	0,05	0,11	0,03	0,10	0,18	0,01		56,59	157,0	158,0	28,6	28,6	4,4	75,7	44,1	13,7	
Ecart type relatif A4				1,30	3,85	12,65	4,67	20,94	4,99	21,42	6,71	57,50		13	28	27	26	18	14	92	29	20	
A5 ISO70	Four A5	tuile	orange-rouge	53,42	29,94	11,13	1,06	0,70	0,61	0,38	2,73	0,03	0,15	1,46	717	862	302	108	188	34	148	148	91
A5 ISO72	Four A5	tuile	orange	54,42	29,90	10,15	1,03	0,66	0,58	0,42	2,82	0,03	0,14	1,01	461	496	309	103	225	46	228	141	125
A5 ISO73	Four A5	tuile	orange	52,61	31,31	10,80	1,05	0,53	0,58	0,58	2,52	0,02	0,18	1,38	522	525	348	114	159	32	294	162	102
A5 ISO74	Four A5	tuile	orange	52,15	31,72	10,07	1,05	0,48	0,73	0,58	3,21	0,02	0,14	0,75	524	509	438	112	168	34	205	146	91
A5 ISO75	Four A5	tuile	orange	53,91	31,71	9,40	1,05	0,34	0,48	0,51	2,60	0,01	0,13	1,21	432	612	529	111	149	28	81	139	96
A5 ISO76	Four A5	tuile	orange rouge	56,90	29,80	7,89	1,30	0,36	0,54	0,43	2,75	0,02	0,16	1,09	570	474	256	212	130	45	154	133	98
A5 ISO77	Four A5	tuile	beige	51,98	30,62	12,12	1,03	0,60	0,59	0,50	2,53	0,04	0,20	1,00	410	524	509	134	235	55	143	178	97
A5 ISO78	Four A5	tuile	orange	54,69	29,32	11,01	1,04	0,81	0,45	0,47	2,31	0,03	0,19	3,88	493	216	396	107	126	37	184	137	108
Moyenne A5 n=8				53,76	30,54	10,32	1,08	0,56	0,57	0,44	2,68	0,03		516	527	386	125	172	39	180	148	101	
Ecart type A5				1,62	0,94	1,28	0,09	0,16	0,09	0,09	0,27	0,01		96,51	177,4	99,87	36,25	40,7	9,0	64,2	14,8	11,2	
Ecart type relatif A5				3,01	3,07	12,38	8,32	29,45	14,98	18,86	9,94	35,68		19	34	26	29	24	23	36	10		