ArcheoSciences

Revue d'archéométrie

40 | 2016

Varia

Gamme de chaux dans les économies anciennes. Méthodes de prélèvement et d'identification des types de chaux dans les fours (DRX, MEB-EDS, pétrographie) (Antiquité, Moyen Âge, époque moderne)

Lime range in ancient economy. Sample and identification methods of types of lime from archeological kilns (XRD, SEM-EDS, petrography) (Antiquity, Middle Ages, Modern Times)

Christophe Vaschalde, Philippe Bromblet et Stéphane Büttner

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/archeosciences/4801>

DOI : 10.4000/archeosciences.4801

ISBN : 978-2-7535-5384-2

ISSN : 2104-3728

Éditeur

Presses universitaires de Rennes

Édition imprimée

Date de publication : 30 décembre 2016

Pagination : 119-135

ISBN : 978-2-7535-5382-8

ISSN : 1960-1360

Référence électronique

Christophe Vaschalde, Philippe Bromblet et Stéphane Büttner, « Gamme de chaux dans les économies anciennes. Méthodes de prélèvement et d'identification des types de chaux dans les fours (DRX, MEB-EDS, pétrographie) (Antiquité, Moyen Âge, époque moderne) », *ArcheoSciences* [En ligne], 40 | 2016, mis en ligne le 30 décembre 2018, consulté le 23 février 2022. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/4801> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4801>

Gamme de chaux dans les économies anciennes

Méthodes de prélèvement et d'identification des types de chaux dans les fours (DRX, MEB-EDS, pétrographie) (Antiquité, Moyen Âge, époque moderne)

Lime Range in Ancient Economy. Sample and Identification Methods of Types of Lime from Archeological Kilns (XRD, SEM-EDS, Petrography) (Antiquity, Middle Ages, Modern Times)

Christophe VASCHALDE^a, Philippe BROMBLET^b et Stéphane BÜTTNER^c

Résumé : La chaux provenant de plusieurs fours de l'Antiquité, du Moyen Âge et de l'époque moderne a été analysée par la diffraction des rayons X, au MEB-EDS et par la pétrographie. Cette chaux présente l'avantage d'être pure, et de ne pas avoir subi les changements chimiques qui ont lieu lors de l'ajout d'adjuvant pendant la fabrication des mortiers. Cette étude montre que les chauxonniers ont produit une grande diversité de chaux (grasses, maigres, hydrauliques, magnésiennes). La diffraction des rayons X, qui présente les résultats les plus prometteurs, éclaire de nombreux aspects des chaînes opératoires de production. Enfin, la mise en perspective de ces résultats avec les sources textuelles montre que la gamme des chaux répond à des besoins spécifiques à certaines filières économiques comme le bâtiment, l'agriculture ou l'industrie. Cet article pose donc les premiers jalons d'une histoire de la circulation et de la consommation des chaux entre l'Antiquité et l'époque moderne.

Abstract: *Lime from ancient, medieval and modern lime kilns was analyzed with X-ray diffraction, SEM-EDS and petrography. Unlike lime from mortars, lime from lime kilns has the advantage of being pure, no admixtures being added yet. This study reveals that lime burners made a great diversity of limes (non-hydraulic, hydraulic, magnesian) The best results were obtained with the XRD method, which documents numerous aspects of the "chaîne opératoire" of lime production. The comparison with ancient, medieval and modern scientists treatises demonstrates that the lime range is essential to many economical sectors, such as construction, agriculture and industry. Through this approach, it is now possible to write a history of lime trade and uses, from Antiquity to the modern times.*

Mots clés : chaux, four, DRX, MEB-EDS, pétrographie, artisanat, industrie, économie.

Keywords: *lime, kiln, XRD, SEM-EDS, petrography, craft, industry, economy.*

^a Docteur en archéologie et histoire du Moyen Âge, Aix-Marseille Université, CNRS, LA3M UMR 7298, 13 094 AIX-EN-PROVENCE, France. (christophe_vaschalde@yahoo.fr)

^b Centre interdisciplinaire de conservation et de restauration du patrimoine (Marseille). (philippe.bromblet@cicrp.fr)

^c Centre d'études médiévales d'Auxerre, associé UMR ARTeHIS 6298, CNRS – Université de Bourgogne, (stephane.buttner@cem-auxerre.fr)

1. INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, la fabrication de la chaux a fait l'objet de plusieurs fouilles et programmes de recherche, particulièrement dans le Midi méditerranéen de la France. La caractérisation des productions de chaux a ainsi pu être relancée, après plusieurs décennies d'arrêt des recherches. En effet, la littérature scientifique relayait le plus souvent le constat d'échec des analyses de chaux sur les mortiers (Démians d'Archimbaud, 1980, 227; Frizot, 1975; Suméra et Veyrat, 1997, 121; Palazzo-Bertholon, 2000), et seules quelques rares études sont parvenues à identifier des chaux faiblement hydrauliques ou magnésiennes au cours des époques antiques et médiévales (Charola *et al.*, 1984; Mannoni, 1994; Martinet et Quenée, 2000; Palazzo-Bertholon, 2000, 205; Coutelas, 2003, 232; Mannoni *et al.*, 2006; Mertens *et al.*, 2006). De ce fait, l'idée d'une utilisation exclusive de chaux aérienne grasse avant les temps industriels s'est répandue dans la littérature archéologique (Coutelas, 2009, 19). Les recherches sur la chauxonnerie du Midi (Vaschalde, 2013) ont permis de changer le point de vue de la recherche, en tentant d'étudier non plus la chaux des mortiers, mais celle des fours. Il s'agit donc de s'intéresser à un matériau non transformé, ce qui permet de s'affranchir des problèmes d'interactions chimiques constatés dans les mortiers entre la chaux et les adjuvants (sable, tuileau, pouzzolane).

La détermination de différents types de chaux, et donc d'une gamme de produits, est un des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement de la chauxonnerie ancienne. À l'instar des analyses physico-chimiques réalisées sur les productions des fours de potiers, il n'est pas sans intérêt de chercher à mieux cerner la nature des matières produites par les chauxonniers, puis échangées. En effet, une approche interdisciplinaire de la question permet de supposer l'existence d'une grande variété de produits. Dans les sources savantes antiques, les médecins, tel Dioscoride¹, explicitent clairement leur besoin en chaux pure. Dans les sources d'archives médiévales du Midi de la France et dans les traités modernes, la multiplicité des utilisations de la chaux dans un grand nombre de secteurs de production laisse également présager une circulation de matériaux diversifiés (Vaschalde, 2013). Surtout, les enquêtes ethnoarchéologiques réalisées auprès des chauxonniers actuels de Tunisie (Vaschalde *et al.*, 2015) ont montré à la fois la multiplicité des produits et la connaissance que les artisans ont des

matières premières et des produits finis. L'identification des chaux anciennes mises au jour dans les fours par l'archéologie présente donc un intérêt primordial.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel

L'étude s'appuie sur 25 échantillons de chaux issus de 15 structures de production datées entre l'Antiquité et le XIX^e siècle (figure 1), fouillées dans le cadre de projets de recherche ou lors d'opérations préventives. Ces fours à chaux sont pour la plupart situés dans les régions méditerranéennes de la France, et certains se trouvent en Île-de-France, en Lorraine, ou encore en Sicile. Bien que tous ces fours soient situés en milieu rural, une distinction peut être opérée entre les installations isolées ayant exploité des bancs de calcaires naturels et les chauxonniers construits sur des sites en cours de démontage et faisant office de carrières de pierres à chaux. Aucun site n'a fourni d'indice fiable pour déterminer la destination de la chaux produite.

Méthode de prélèvement

La mise en œuvre des analyses de laboratoire portant sur la chaux détermine à la fois la quantité de matériau à prélever et le protocole à appliquer. Si l'analyse au MEB-EDS et la diffraction des rayons X nécessitent des quantités très petites de chaux, il n'en est pas de même pour la pétrographie. Pour cette dernière, les échantillons doivent avoir une taille de l'ordre de 10 à 15 cm. La réalisation de tels prélèvements dépend avant tout de la nature de la chaux retrouvée dans les fours. Les couches de chaux carbonatée sont parfois épaisses et compactes ou, au contraire, fines et pulvérulentes (tableau 1). À Sorède, aucun bloc n'a pu être prélevé dans le four. C'est donc une quantité équivalente à 0,5 l. de chaux qui a été échantillonnée. Dans deux fours (Peynier, Vallon de l'Homme Mort, et Cassis), un matériau de couleur beige, compact, était pris dans les couches de chaux carbonatée. Du fait de sa couleur et de la présence de litages, son identification comme chaux n'était pas assurée.

La méthode de prélèvement a évolué à l'aune des résultats des recherches sur la chauxonnerie. Dans un premier temps, deux échantillons ont été prélevés dans chaque unité stratigraphique pour assurer une quantité suffisante. Les premiers résultats des analyses DRX laissaient soupçonner de possibles pollutions post-dépositionnelles. En effet, les couches archéologiques de chaux ont pu être perturbées lors du défournement. Des enquêtes ethnoarchéologiques

1. Pedanius Dioscorides of Anazarbus, *De materia medica*, translated by Y. Beck, Hildesheim-Zürich/New York, Olms-Weidmann, 2005, XXVIII-540 p.

Figure 1 : Répartition géographique et détail des sites étudiés.

Figure 1: Location and details of the studied sites.

N°	Site	Datation*	Matière première	Référence
1	Sorède	EM	Bancs naturels	Vaschalde, 2013, 3, 139
2	Villeveyrac	HMA	Bancs naturels	Vaschalde <i>et al.</i> , 2014
3	Saint-Gilles	AT	Récupération	Vaschalde, 2013, 1, 192
4	Vallon-Pont-d'Arc	EM	Bancs naturels	Duny <i>et al.</i> , 2011
5	Bollène	MAC	Bancs naturels	Thiriot, 2005-2006
6a	Rognes, FR1	MAC	Bancs naturels	Ropiot <i>et al.</i> , 2014
6b	Rognes, FR8	MAC	Bancs naturels	Ropiot <i>et al.</i> , 2014
7a	Peynier, PEY1A5	EM	Bancs naturels	Vaschalde, 2013, 3, 122
7b	Peynier, PEY4A1	EM	Bancs naturels	Vaschalde, 2013, 3, 127
8	Signes	EM	Bancs naturels	Vaschalde, 2013, 3, 137
9	Cuers	BMA-EM	Bancs naturels	Chapon, 2012
10	Cassis	EM	Bancs naturels	Thomas, 2009
11	Châteaubateau	AT	Récupération	Inédit
12	Laquenexy	MAC	Bancs naturels	Brkojewitsch, 2015
13	Megara Hyblaea	A	Récupération ?	Gras, Tréziny, 2009

* A : Antiquité ; AT : Antiquité tardive ; HMA : Haut Moyen Âge ; MAC : Moyen Âge central ; BMA : Bas Moyen Âge ; EM : époque moderne

N°	Site	État des échantillons	Nb d'éch.	Analyses effectuées		
				Pétrographie	MEB-EDS	DRX
1	Sorède	Pulvérulents	1	x	x	x
2	Villeveyrac	Solide	9			x
3	Saint-Gilles	Pâteux	1	x	x	x
4	Vallon-Pont-d'Arc	Pulvérulents	1		x	x
5	Bollène	Solide	1			x
6a	Rognes, FR1	Solide	1		x	x
6b	Rognes, FR8	Solide	1		x	
7a	Peynier, PEY1A5	Solide blanche/solide beige	2	x	x	x
7b	Peynier, PEY4A1	Solide	1		x	
8	Signes	Solide	1	x	x	x
9	Cuers	Solide	1			x
10	Cassis	Solide blanche/solide beige	2	x		x
11	Châteaubateau	Solide	1		x	x
12	Laquenexy	Solide	1			x
13	Megara Hyblaea	Solide	1		x	

Tableau 1 : Nature des échantillons prélevés et des analyses effectuées.

Table 1: Samples and analysis realized.

réalisées au Maghreb ont en effet montré combien les artisans peuvent remuer les matériaux chargés dans les fours, voire en ajouter d'autres (Vaschalde *et al.*, 2015). La question de la représentativité de chacun de ces prélèvements par rapport à la couche de chaux d'origine s'est rapidement posée, particulièrement lorsque des phases minéralogiques atypiques sont apparues. Une nouvelle méthode de prélèvement a été élaborée et appliquée lors de la fouille d'un chaufour à Villeveyrac. Une fois la couche de chaux du four

entièrement mise au jour, neuf échantillons ont été prélevés, répartis de manière homogène sur la couche et situés en plan (figure 2). De manière générale, et à l'instar des difficultés parfois rencontrées dans le prélèvement des mortiers de construction en archéologie du bâti (Coutelas, 2009, 126), une attention particulière doit être apportée aux éventuelles pollutions provenant des autres unités stratigraphiques, et à la distinction d'éventuelles phases.

Figure 2 : Plan du four de Villeveyrac avec positionnement des 9 échantillons prélevés dans le reste de charge de chaux.

Figure 2: Plan of Villeveyrac lime kiln with positions of the 9 samples made in the remaining of the lime charge.

Pétrographie

L'analyse pétrographique doit beaucoup à la géologie. Son application à l'étude des mortiers remonte au début des années 1980 (Dupas, 1982; Palazzo-Bertholon, 2000, 204; Elsen, 2006). Elle est décomposée en deux temps, dont le premier est une observation macroscopique des échantillons, à l'œil nu, à la loupe simple ou binoculaire (x10). Lorsque les échantillons sont suffisamment gros et compacts, des lames minces sont réalisées pour une observation à l'aide d'un microscope optique polarisant (Coutelas, 2009, 128). L'analyse pétrographique permet notamment de décrire les matrices, de déceler la présence d'incuits ou de mal-cuits, de comprendre l'évolution post-dépositionnelle de certains des échantillons, ou de mettre en avant des anomalies dans la composition du matériau. Cette approche a été réalisée par S. Büttner.

Analyse élémentaire au MEB-EDS

Par un bombardement d'électrons, la microscopie électronique produit différentes images du matériau analysé. L'image topographique est fournie par les électrons secondaires, et l'image en « contraste chimique » par les électrons rétrodiffusés. Par ailleurs, la matière émet également des rayons X qui sont captés par un détecteur *Energy Dispersive System* (EDS). Ainsi, la composition élémentaire peut être analysée de manière semi-quantitative ou quantitative, parfois ponctuellement sur un élément précis, ou intégralement sur toute la zone observée (Coutelas, 2009, 144). Cette analyse permet de détecter la présence d'éléments pouvant

influencer sur la nature précise de la chaux (magnésium, aluminium notamment), tout comme celle d'autres matériaux, comme le gypse par exemple.

Les acquisitions peuvent être réalisées sur lames minces non couvertes, après métallisation. Ici, les échantillons, dont les dimensions sont d'ordre millimétrique, sont disposés dans le MEB sans lame ni métallisation. Des spectres ponctuels et intégraux ont été réalisés pour chaque fragment. Ces analyses ont été réalisées sur le MEB Crystal probe du Service commun de microscopie électronique et analytique de l'université de Montpellier, par C. Vachalde avec l'assistance de Cl. Gril².

Diffraction des rayons X (DRX)

La diffractométrie, ou diffraction des rayons X, est utilisée couramment pour distinguer les phases cristallisées, les associations minérales ou les minéraux d'altération (Schultz, 1964; Biscaye, 1965; Moropoulou *et al.*, 1995 et 2000; Palazzo-Bertholon, 2000, 205). Cette analyse est parfois privilégiée au détriment du MEB-EDS, dont les résultats ouvrent moins souvent la voie à des interprétations plus abouties (Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2010). Ici, les échantillons ont été traités avec la méthode dite « des poudres ». Le matériau est réduit en une fine poudre, sur laquelle tombe le faisceau de rayons X monochromatique. Les faces cristallines provoquent alors des diffractions, qui sont différentes d'un minéral à l'autre en fonction de la distance interplanarie. Sur le diffractogramme, ce phénomène se traduit alors en pics, correspondant à des angles précis. Chaque distance réticulaire se traduit par un pic, qui correspond à un minéral cristallin (Ferdrière, 1999, 49; Coutelas, 2009, 145). Dans le cadre de l'étude des chaux, la DRX rend possible la distinction de certains éléments procédant des altérations du matériau (weddelite par exemple), de sa carbonatation incomplète (portlandite), ou signant la nature de la chaux elle-même (chaux magnésienne notamment). Ici, le traitement des échantillons a été opéré par P. Bromblet sur un diffractomètre D8 Focus de BRUKER (détecteur linéaire LynxEye, anode Co, 35kV x 40 mA).

3. RÉSULTATS

La mise en œuvre des différentes techniques d'analyse des matériaux livre des résultats très prometteurs. Mettre un nom sur les chaux produites dans les fours ouvre un vaste champ d'investigations scientifiques et historiques. Les

2. Ingénieur d'études, Université de Montpellier.

N°	Site	Matière première		Analyses effectuées sur les chaux			Conclusion
		Données géologiques	Composition	Pétrographie	MEB-EDS	DRX	
1	Sorède	Calcaire marmoréen	Calcaire	Matrice carbonatée contenant un broyat de roche calcaire et de quartz	CaCO ₃ + traces d'Al, Mg et Si	Calcite, aragonite, quartz, micas	Chaux aérienne grasse
2	Villeveyrac	Campanien-Maastrichtien Kimméridgien	Calcaire marneux Calcaire pur, parfois dolomitique			Calcite, quartz, aragonite, kaolinite, argiles à 14Å	Chaux aérienne grasse
3	Saint-Gilles	Récupération		Carbonate de calcium très pur	CaCO ₃ + Mg (0,89-1,45 %), Si (3,08-6,25 %) et Al (traces)	Calcite, portlandite, brucite, huntite, pyroaurite/sjogrenite	Chaux magnésienne
4	Vallon-Pont-d'Arc	Barrémien/Urgonien	Calcaire, parfois marneux		CaCO ₃ + traces d'Al et Si	Calcite, quartz	Chaux aérienne grasse
5	Bollène	Coniacien, santonien et turonien	Calcaire argileux Calcaire quartzeux			Calcite, quartz, aragonite et cristobalite	Chaux aérienne grasse
6a	Rognes, FR1	Maastrichtien supérieur et Hauterivien supérieur	Calcaire argileux et marneux		CaCO ₃ + traces d'Al et Si	Calcite, quartz	Chaux aérienne grasse
6b	Rognes, FR8	Maastrichtien supérieur et Hauterivien supérieur	Calcaire argileux et marneux		CaCO ₃ + traces d'Al, Mg et Si		Chaux
7a	Peynier, PEY1A5	Portlandien	Calcaire	Carbonate de calcium contenant quelques mal-cuits	CaCO ₃ + traces d'Al et Si	Calcite, quartz	Chaux aérienne grasse
7b	Peynier, PEY4A1	Maastrichtien inférieur	Calcaire marneux		CaSO ₄		Plâtre
8	Signes	Urgonien	Calcaire	Carbonate de calcium (très peu de mal-cuits)	CaCO ₃ + traces d'Al	Calcite, quartz, portlandite	Chaux aérienne grasse
9	Cuers	Muschelkalk et galets alluvionnaires	Calcaire dolomitique			Calcite, quartz, pyroaurite/sjogrenite	Chaux magnésienne
10	Cassis	Cénomaniens	Calcaire marneux	Carbonate de calcium contenant quelques mal-cuits		Calcite, portlandite, gypse et ettringite	Chaux aérienne maigre
11	Châteaubateau	Récupération			CaCO ₃ + Si (0,42-19,48 %) et traces de Mg	Calcite, quartz, thaumasite	Chaux hydraulique ?
12	Laquenexy	Récupération ?				Calcite, portlandite, quintinite 2H, pyroaurite	Chaux magnésienne
13	Megara Hyblaea	Récupération ?			CaCO ₃ + traces de Mg et Si		Chaux

Tableau 2 : Tableau de synthèse des données géologiques et des résultats des analyses effectuées sur les chaux.

Table 2: Geological data and lime analysis results.

résultats sont présentés par types de matériaux déterminés, et rassemblés dans un tableau synthétique (tableau 2). Pour certains échantillons, toutes les analyses n'ont pas été effectuées, car les quantités disponibles étaient trop petites. La diffraction des rayons X a été privilégiée, car elle fournit les résultats les plus intéressants. Lorsque cette dernière n'a pu être réalisée du fait d'échantillons disponibles trop petits, le type de chaux n'a pas pu être déterminé.

Apport du protocole de prélèvement

La question de la représentativité des échantillons prélevés par rapport à la masse de chaux laissée dans les fours est résolue grâce à la méthode appliquée à Villeveyrac. En effet, les 9 échantillons analysés en DRX fournissent des résultats très cohérents (tableau 3), avec une chaux grasse principalement composée de carbonate de calcium contenant de l'aragonite, du quartz et quelques traces d'argiles dont la kaolinite. Ces résultats permettent également de supposer que les échantillons uniques prélevés dans les autres fours sont représentatifs de la production initiale. Quoi qu'il en soit, il paraît justifié de recommander une multiplication des prélèvements dans les fours qui seront fouillés à l'avenir.

Par ailleurs, la nature pulvérulente ou compacte de la chaux prélevée n'influence pas les résultats des analyses au MEB-EDS et en DRX. Seule la pétrographie est impossible à appliquer sur les chaux pulvérulentes.

Les chaux aériennes calciques grasses

Les chaux aériennes grasses (figure 3) sont les plus couramment identifiées, dans 7 structures sur 15. Parmi ces

	Calcite	Quartz	Autres minéraux
P10	xxxx	x	Aragonite
P22	xxx	x	Aragonite, Argiles 15,2Å (traces)
P23	xxxx	x	Aragonite (traces)
P24	xxxx	x	Kaolinite (traces)
P25	xxxx	x	
P26	xxxx	x	Aragonite
P27	xxxx	x	
P29	xxxx	x	
P34	xxxx	x	

Tableau 3 : Résultats des analyses DRX effectuées sur la chaux de Villeveyrac.

Table 3: XRD analysis results of Villeveyrac lime.

structures, on compte le four du Vallon de l'Homme Mort à Peynier, dans lequel un matériau beige non identifié et mélangé à la chaux carbonatée avait été prélevé. La pétrographie et la DRX ont permis de déterminer qu'il s'agit d'une chaux aérienne grasse, dont la coloration provient sans doute de la décomposition de matériaux organiques après l'abandon du four.

Par définition, les chaux aériennes grasses se caractérisent par une grande pureté, car composées presque essentiellement de carbonate de calcium (CaCO_3) avec peu d'impuretés. Ces chaux sont produites à partir de calcaires contenant moins de 1 % d'argiles (Frizot, 1975, 23 ; Coutelas, 2003, 72 et 2009, 16). Des traces de quartz ont été identifiées par l'analyse DRX, mais cette présence s'explique aisément du fait de la présence presque systématique de ce minéral dans les formations calcaires. Sur les clichés pris au MEB, la chaux prend la forme d'un conglomerat de petits nodules clairs.

Les chaux aériennes maigres et les chaux hydrauliques

Dans le corpus étudié, deux fours ont produit des chaux pouvant être considérées comme aériennes maigres, voire faiblement hydrauliques. Un troisième peut avoir servi à fabriquer de la chaux hydraulique. Une chaux aérienne maigre est une chaux obtenue par cuisson d'un calcaire contenant des impuretés (quartz, mica, argiles, etc.). Après cuisson, ces calcaires fournissent une chaux moins riche en portlandite, qui produit donc moins de calcite que la chaux grasse au cours de sa carbonatation. Les proportions de ces impuretés (magnésie, manganèse, oxyde de fer, sables quartzeux, etc.), provenant des argiles contenues dans le calcaire, varient selon les auteurs. M. Frizot indique qu'elles sont inférieures à 5 % (Frizot, 1975, 23), tandis qu'A. Coutelas donne un intervalle compris entre 2 et 8 % (Coutelas, 2003, 16). Une chaux hydraulique est aussi obtenue à partir d'un calcaire impur contenant principalement des argiles, mais à des températures de cuisson élevées, de sorte que des phases hydrauliques anhydres (alumineuses ou silicatées) se forment (C3A, C2S) par réaction entre les argiles et le calcium qui produisent des silicates de calcium hydratés (CSH) au contact de l'eau.

Les chaux aériennes maigres (figure 4) sont composées pour l'essentiel de carbonate de calcium, auquel s'ajoutent des phases minérales comme l'ettringite et le gypse, minéraux composés de sulfate et de sulfoaluminate de calcium. Dans le cas du four de Cassis, qui a servi à cuire des pierres issues de bancs naturels, l'aluminium et le calcium peuvent venir des bancs de cénomaniens, composés de calcaire à rudiste avec bancs de marnes et de grès. La marne a pu être

Figure 3 : Analyse des chaux aériennes grasses : a : lame mince vue en lumière naturelle de chaux carbonatée grasse (Peynier, Vallon de l'Homme Mort – cl. : S. Büttner); b : image en électrons secondaires (MEB) d'une chaux carbonatée (Rognes, FR1); c : spectre des nodules de chaux carbonatée du four FR1 de Rognes au MEB-EDS; d : diffractogramme de la chaux du four du Vallon de l'Homme Mort à Peynier; e : diffractogramme de la chaux du four de Signes.

Figure 3: Pure limes analysis: a: thin section with natural light of carbonated pure lime (Peynier, Vallon de l'Homme Mort – ph.: S. Büttner); b: secondary electrons imaging (SEM) of a carbonated lime (Rognes, FR1); c: spectrum of carbonated lime samples of Rognes kiln FR1 (SEM-EDS); d: X-ray diffraction pattern from the lime of the Vallon de l'Homme Mort kiln at Peynier; e: X-ray diffraction pattern from the lime of Signes kiln.

à l'origine de l'apparition de l'aluminium dans la chaux. L'origine du soufre est plus problématique. Il peut s'agir de gypse exploité par les artisans, mais une contamination de la chaux par des embruns marins ne peut être exclue, le site étant peu éloigné du littoral. L'eau de mer contient une forte proportion de sulfate de calcium.

À Châteaubateau, le four du théâtre a également fourni une chaux composée majoritairement de carbonate de calcium, et contenant de la thaumasite (figure 5). Étant pauvre en

phases autres que la calcite, il s'agit donc d'une chaux faiblement hydraulique. En effet, la thaumasite est un sulfosilicate de calcium qui apparaît parfois dans les mortiers contenant des composantes hydrauliques. Des expérimentations ont mis en évidence le lien possible entre l'utilisation de la chaux hydraulique et l'apparition de la thaumasite (Van Hees *et al.*, 2003; Tesch et Middendorf, 2006). Toutefois, le soufre étant un des composants de la thaumasite, cela suppose un apport extérieur pour expliquer l'apparition de cet élément

Figure 4 : Analyse des chaux aériennes maigres : a : lame mince vue en lumière naturelle de chaux carbonatée maigre (Cassis – cl. : S. Büttner) ; b : spectre d'analyse DRX de la chaux du four de Cassis.

Figure 4: Poor limes analysis: a: thin section with natural light of carbonated poor lime (Cassis – ph.: S. Büttner); b: X-ray diffraction pattern from the lime of Cassis kiln.

Figure 5 : Analyse des chaux potentiellement hydrauliques : a : image en électrons rétrodiffusés (MEB) de la chaux provenant du four de Châteaubleau ; b : spectre de la chaux hydraulique du four de Châteaubleau au MEB-EDS ; c : diffractogramme de la chaux du four de Châteaubleau.

Figure 5: Hydraulic limes analysis : a : backscattered electrons imaging (SEM) of the lime of Châteaubleau kiln; b: spectrum (SEM-EDS) of hydraulic lime of Châteaubleau kiln; c: X-ray diffraction pattern from the lime of Châteaubleau kiln.

qui aurait ensuite réagi avec les composants silicatés de la chaux supposée hydraulique. Le soufre peut provenir de phases de gypse enfourné avec le calcaire, ou d'une pollution postérieure à l'abandon du four. Notons que les pierres cuites à Châteaubleau ont été récupérées sur un site antique abandonné, ici le théâtre. L'origine de la matière première est donc complexe à comprendre, du fait de la présence de deux calcaires différents (calcaire de Provins et calcaire lutétien). Une étude approfondie des calcaires utilisés dans la construction du théâtre de Châteaubleau pourrait éclairer ce problème. En l'état, il n'est pas possible de conclure sur la nature hydraulique de la chaux de Châteaubleau, mais la question est désormais ouverte.

Les chaux aériennes magnésiennes

Trois chauffours ont produit de la chaux magnésienne (figure 6), composée de carbonate de calcium et de minéraux contenant du fer et du magnésium, tels que la brucite, l'huntite, la pyroaurite, la quintinite-2H et la sjogrenite. À Cuers, la chaux a certainement été produite à partir des formations calcaires formant la colline du Pas Redon, au pied de laquelle a été installé le four. D'après la carte géologique, ces calcaires appartiennent à des faciès Muschelkalk indifférenciés. Il s'agit probablement de Muschelkalk inférieur, qui est le seul à être considéré comme dolomitique. En effet, un calcaire est dit magnésien lorsqu'il contient entre 5 et 10 % de magnésium, et il est qualifié de dolomitique lorsque la proportion de magnésium est comprise entre 10 et 50 % (Foucault et Raoult, 2010, 55). Ces calcaires contiennent

Figure 6 : Analyse des chaux magnésiennes : a : lame mince vue en lumière naturelle de chaux carbonatée magnésienne (Saint-Gilles – cl. : S. Büttner) ; b : spectre de la chaux magnésienne du four de Saint-Gilles au MEB-EDS ; c : diffractogramme de la chaux du four de Saint-Gilles ; d : diffractogramme de la chaux du four de Cuers.

Figure 6 : Magnesian limes analysis: a: thin section with natural light of carbonated magnesian lime (Saint-Gilles – ph.: S. Büttner); b: spectrum (SEM-EDS) of magnesian lime of Saint-Gilles kiln; c: X-ray diffraction pattern from the lime of Saint-Gilles kiln; d: X-ray diffraction pattern from the lime of Cuers kiln.

généralement de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ou de l'ankérite ($\text{Ca}(\text{MgFeMn})(\text{CO}_3)_2$). Leur composition chimique peut donc receler du fer ou du manganèse associé au magnésium. À Saint-Gilles, l'origine de la matière première est plus problématique du fait d'un contexte de récupération des pierres sur des monuments appartenant à une nécropole antique dont l'emplacement est toujours inconnu. L'étude des éléments lapidaires découverts dans le four n'a pas encore été faite. À Laquenexy, il semble s'agir également d'une activité de récupération.

Du plâtre dans les fours à chaux

Des traces de gypse, qui pourraient correspondre à du plâtre, ont été mises en évidence par les analyses au MEB-EDS et la DRX dans les chauffours de Cassis et du quartier de Bel Homme à Peynier. À Cassis, ces traces sont accompagnées d'ettringite, minéral qui se forme par suite de l'altération d'une chaux contenant des phases hydrauliques en contact avec de l'eau contaminée en sulfates (Böke et Akkurt, 2003). Cette présence peut s'expliquer par l'utilisation, intentionnelle ou non, de gypse dans la charge des fours. À Peynier, l'existence d'une carrière de plâtre est attestée non loin du site aux XV^{e} - XVII^{e} siècles (Vaschalde, 2008). Sans envisager une cuisson de gypse dans ce four où tout indique que les températures sont bien trop élevées pour la fabrication du plâtre (vitrification des parois notamment), il est possible que des blocs de gypse aient pu être utilisés par les artisans comme matériaux annexes à la cuisson (matériaux réfractaires?). Cependant, la détermination de gypse par les analyses de laboratoire ne signe pas forcément la présence de plâtre dans les fours. Elle peut en effet découler d'altérations du calcium dues à des sulfures, intervenues bien après la cuisson (Böke et Akkurt, 2003; Bertolini *et al.*, 2013).

4. DISCUSSION ET MISE EN PERSPECTIVE

Les résultats obtenus grâce à la DRX, à la pétrographie et au MEB-EDS ouvrent plusieurs pistes de réflexion, à propos des techniques de fabrication, des filières d'écoulement et des contextes de consommation, ainsi que des orientations de la recherche à venir.

Une aide à l'identification des structures archéologiques

En tout premier lieu, les analyses de matériaux sont une aide à l'interprétation de certaines structures. À Mégara

Hyblaea (Sicile), les différents fours découverts anciennement sur le site sont actuellement au centre d'une réflexion globale, remettant en cause certaines interprétations considérées comme acquises. Les fouilles étant anciennes, plusieurs structures de cuisson sont vidées de leur contenu depuis plusieurs dizaines d'années, et il s'avère parfois difficile de déterminer leur usage précis. C'est le cas du grand four n° 3. Mais une croûte blanchâtre, encore collée par endroits sur les parois de briques, a été prélevée et soumise à une analyse élémentaire au MEB-EDS. Elle a montré que ce matériau est un carbonate de calcium contenant quelques traces de magnésium et de silice. La production de chaux dans cette structure est donc confirmée. À Rognes, l'exemple de la structure FR1 est encore plus probant. Cette fosse sans gueule a une structure peu commune, rendant problématique son interprétation (Vaschalde, 2013, 260-262). Le MEB-EDS a démontré la présence de chaux dans le remplissage, ainsi que dans l'épandage voisin. Une étude comparable sur un four antique d'Escrennes (Loiret) a également permis d'identifier la structure de production grâce au recours à la DRX (Save *et al.*, 2013). Parfois, ces analyses de laboratoire ne vont pas dans le sens des présupposés interprétatifs de terrain. Par deux fois, du gypse a été identifié dans des fours à chaux, d'abord à Peynier (Bel Homme) par analyse au MEB-EDS, puis à Cassis grâce à la DRX. Dans ces deux cas, ces résultats incitent à s'interroger sur l'origine du soufre qui compose les phases identifiées, notamment au cours des processus post-dépositionnels. Si du plâtre a effectivement été cuit, il faut s'interroger sur son utilité dans la chaîne opératoire de la fabrication de la chaux.

D'un point de vue taphonomique, une incertitude demeure sur la nature même d'une partie des couches de chaux découvertes dans plusieurs fours. Ces couches présentaient une couleur beige à jaune, avec parfois des litages, et contenaient également des nodules très blanc de chaux carbonatée assez pure. De petits fragments d'aspect vitrifié étaient également fréquents. Une première observation à la loupe binoculaire, effectuée par J.-E. Brochier³, avait conduit à envisager des agglomérats sableux qui se seraient formés dans les fours après l'abandon, à la suite d'événements climatiques ponctuels (pluies, inondations). Ces phénomènes, qui auraient dû provoquer des perturbations dans la stratigraphie des structures, paraissent peu probables car trop systématiques. L'observation pétrographique d'abord, puis les résultats des analyses au MEB-EDS ont montré qu'il n'y avait pas de sable, et que ces couches étaient simplement formées de chaux carbonatée, dont la coloration provient de la décomposition d'éléments organiques. La stratigraphie des chauffours

3. CR CNRS, LAMPEA UMR 7269.

concernés, loin d'être perturbée, a, au contraire, peu subi de bouleversements post-dépositionnels. Rappelons que la validité du protocole de prélèvement anthracologique repose sur cette condition (Vaschalde *et al.*, 2013). La DRX apporte également quelques informations sur l'évolution des couches de chaux dans les fours après leur abandon. La chaux s'y éteint doucement et sèche, mais, si elle est recouverte entièrement ou seulement partiellement, elle peut demeurer longtemps à l'état d'hydroxyde de calcium, c'est-à-dire de chaux éteinte. La présence de portlandite signe ce phénomène. Elle a été détectée dans les chaux des fours de Saint-Gilles, de Cassis, de Laquenexy et de Signes. Ce constat est assez courant dans les publications d'analyses de mortiers archéologiques (Allen *et al.*, 2000; Moropoulou *et al.*, 2000; Bartz et Filar, 2010). Parfois, certains minéraux apparaissent également, comme l'aragonite (Sorède), typique des calcifications naturelles dues à l'écoulement des eaux.

Apport de la DRX à la connaissance des techniques de production

Choix des matières premières

Dans la littérature scientifique et archéologique, il est couramment admis que les chauxfourniers n'ont produit que des chaux aériennes, et que les calcaires impurs auraient été écartés de la production par les artisans (Coutelas *et al.*, 2004; Coutelas, 2009, 19). Or, l'identification de chaux faiblement hydrauliques et de chaux magnésiennes remet en cause ce constat. Elle étaye également les observations faites directement sur les pierres à chaux mal cuites des fours tardo-antiques de la place des Véens à Auxerre (Mercier, 2011, 109), qui ont été alimentés avec un calcaire portlandien local riche en impuretés. Il semble donc que tous les calcaires aient pu être utilisés par les chauxfourniers. Toutefois, ces résultats ne démontrent pas le caractère volontaire de cette utilisation. Avec les seules analyses de laboratoire, il n'est pas encore possible de montrer que les chauxfourniers connaissaient toutes les propriétés des pierres qu'ils ont utilisées. Ce problème est d'autant plus complexe que des fours ayant été alimentés avec des pierres récupérées ont produit des chaux magnésiennes ou potentiellement hydrauliques.

Les analyses permettent également de préciser les stratégies d'approvisionnement. En effet, pour certains sites, plusieurs sources d'approvisionnement sont possibles autour des fours à chaux. À Villeveyrac, les chauxfourniers avaient le choix entre les bancs de calcaires marneux du Campagnien-Maastrichtien et ceux, plus purs, du Kimmeridgien. À Cuers, ils disposaient des bancs de calcaire dolomitique du Muschelkalk et de galets alluvionnaires. De la chaux grasse

ayant été identifiée à Villeveyrac, et de la chaux magnésienne à Cuers, il est possible d'affirmer que les calcaires utilisés proviennent du Kimmeridgien dans le premier cas, et du Muschelkalk dans le second. Des aires d'approvisionnement plus précises peuvent donc être définies, ce qui ouvre la voie à une approche spatiale.

Températures de cuisson

L'analyse archéométrique des chaux archéologiques apporte des informations sur les températures de cuisson des fours. Pour rappel, il est communément admis qu'une température comprise entre 900 et 1 100 °C est nécessaire pour produire de la chaux.

La DRX apporte des informations sur le fonctionnement des fours à chaux grâce à l'identification de minéraux. Lors de la cuisson de la chaux, la montée en température provoque l'apparition et la destruction successives de certaines phases cristallines, qui sont alors des marqueurs des niveaux de chaleur atteints (Périnet et Courtois, 1983, 157). Dans le four de Bollène, la présence de cristobalite a été mise en évidence dans la chaux. Ce dioxyde de silicium impur apparaît à 1 470 °C à partir d'éléments argileux, mais peut se former, sous certaines conditions, à partir de 1 050 °C (Gualtieri et Bertolani, 1992). Ainsi, sa présence a été décelée dans les parois d'argile cuite d'un four de potier antique (Eramo et Maggetti, 2013), ainsi que dans des poteries cuites à haute température (Marengo *et al.*, 2005; Lazzarini et Verità, 2015; Jadot *et al.*, 2016). Par le passé, des exemples similaires ont permis de proposer des températures de cuisson. Dans la cathédrale de Tournai (Belgique), les mortiers médiévaux contenaient certains minéraux, comme la pseudowollastonite, qui n'apparaît que lorsque la température dépasse 1 125 °C (Mertens *et al.*, 2006) et qui ne peut donc provenir que de fours ayant atteint cette température. En Espagne, le même type d'analyse et de raisonnement a été mis en œuvre pour les mortiers de l'église tardo-antique et médiévale de Santa Eulalia de Bóveda (Sanjurjo-Sánchez *et al.*, 2010).

La production de chaux aériennes maigres, faiblement hydrauliques voire hydrauliques n'est pas sans incidence sur la gestion des cuissons. D'après les sources savantes du XIX^e siècle, la cuisson des calcaires dits « impurs » nécessite une attention plus particulière de la part des artisans, pour éviter la « vitrification des matières fondantes » contenues dans cette matière première⁴. À l'inverse, les calcaires purs permettant de fabriquer les chaux grasses « peuvent être

4. Magnier M.-D., *Nouveau manuel complet du chauxfournier, plâtrier, carrier contenant l'exploitation des carrières et la fabrication du plâtre, des différentes chaux, des ciments, mortiers, bétons, etc.*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1864, p. 10.

fortement calcinés sans inconvénients ». Ces différences de comportement au feu influencent les savoir-faire, car elles impliquent une variation des gestes de surveillance opérés par les artisans pendant les cuissons. La mise en évidence de cristobalite à Bollène est à rapprocher du phénomène de « vitrification », ce minéral se formant à partir de matières siliceuses comme les quartz, souvent présents dans les pierres calcaires.

La mise en évidence d'une production de chaux magnésienne invite à envisager des cuissons à plus basse température. En effet, lorsqu'il est cuit, le calcaire dolomitique ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) se transforme en oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO). Dans la pierre, le carbonate de magnésium se transforme avant le carbonate de calcium⁵, et cette transformation s'opère à partir de 750 °C, soit une température plus basse que celle nécessaire à la cuisson de la chaux grasse. Pour cuire l'ensemble d'une charge de calcaire dolomitique, il est ensuite nécessaire d'atteindre la température de transformation du carbonate de calcium en chaux vive (CaO). L'ensemble du processus de cuisson diffère donc des fours à chaux grasse, maigre ou hydraulique. Le début de la transformation chimique s'opérant à plus basse température, une incidence sur le temps de cuisson est envisageable, ce qui impliquerait donc une gestion particulière de la chaîne opératoire. Notons également que la chaux magnésienne serait plus de deux fois inférieure en poids que le calcaire chargé dans le four⁶.

Identifier les chaux pour identifier les filières économiques

Le principal apport de la DRX appliquée aux chaux non transformées concerne l'identification d'une gamme de différents produits, dont les qualités répondent à des besoins particuliers qui sont eux-mêmes liés aux contextes de consommation. Parmi eux, on compte bien sûr le secteur du bâtiment, mais aussi l'agriculture, l'artisanat et l'industrie (cuir, verre, sucre, savon...) et la médecine.

La chaux grasse, recherchée pour sa pureté

La chaux la plus souvent identifiée dans le corpus étudié est la chaux aérienne grasse. Cette abondance s'explique par le fait que les sociétés anciennes l'ont beaucoup recherchée. Sa pureté, souvent vantée dans les sources savantes, répond à bon nombre de besoins techniques des secteurs du bâtiment

et de l'artisanat. Au moment de l'extinction, une chaux grasse foisonne beaucoup, pour prendre jusqu'à quatre fois son volume initial⁷. Elle se conserve longtemps sous l'eau, sous forme pâteuse, ou dans un milieu clos, privé d'air.

Les secteurs consommateurs de chaux grasse sont nombreux, au premier rang desquels on trouve le bâtiment. D'après les auteurs antiques comme modernes, cette chaux sert surtout à la confection des mortiers de gros œuvre⁸. Elle est également recommandée et très utilisée pour la réalisation des couches de préparation des peintures murales.

Dès l'Antiquité, et tout au long du Moyen Âge et de l'époque moderne, certains secteurs de l'artisanat et de l'industrie ont utilisé la chaux grasse pour ses propriétés caustiques, pour sa pureté ou comme fondant. La production de sucre nécessite également de la chaux. Les fabricants semblent avoir privilégié la chaux grasse, qui offrirait des « conditions excellentes » pour le raffinage⁹. Quelques traités recommandent toutefois l'utilisation d'une chaux maigre. Pour une même quantité de produit à raffiner, il faut mobiliser une quantité plus importante de chaux maigre, mais cette dernière produit un déchet moins volumineux¹⁰. Les savonniers ont également privilégié la chaux grasse. Elle permet la décomposition des carbonates de potasse et de soude afin de préparer les lessives caustiques¹¹. Enfin, les verriers utilisent la même chaux, qui sert de fondant pour abaisser la température de fusion du verre¹². La chaux grasse est intéressante pour l'industrie du verre car sa pureté chimique évite d'ajouter des éléments indésirables à la composition du produit final. Il reste à évoquer

7. Biston V., *Manuel théorique et pratique du chauxfournier, contenant l'art de calciner la pierre à chaux et à plâtre; de composer toutes sortes de mortiers ordinaires et hydrauliques, cimens, pouzzolanes artificielles, bétons, mastics; briques crues, pierres et stucs ou marbres factices propres aux constructions*, Paris, 2^e édition, Librairie encyclopédique de Roret, 1836, p. 181; Vergnaud A., *Nouveau manuel...*, 1838, p. 330; Magnier M.-D., *Nouveau manuel...*, 1864, p. 74.

8. Vitruve, *De l'architecture*, II, 5, 2; Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, XXXVI, 174; Palladius, *De re rustica*, I, X; Philibert de l'Orme, *Le premier tome de l'architecture*, Paris, chez Frédéric Morel, 1567, f° 27 v°; Félibien A., *Des principes de l'architecture, de la sculpture, de la peinture et des autres arts qui en dépendent*, Paris, chez la veuve Jean Baptiste Coignard et fils, 3^e édition, 1697, p. 33; Toussaint Cl.-J., Magnier M.-D., *Nouveau manuel complet du maçon, du couvreur, du paveur et du carreleur...*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1864, p. 66.

9. Basset N., *Guide pratique du fabricant de sucre*, Paris, Librairie du dictionnaire des arts et manufactures, 1872, vol. 2, p. 316.

10. Mathieu de Dombasle C.-J.-A., *Fabrication simple et peu dispendieuse du sucre indigène*, Paris, chez Mme Huzard, 1838, p. 31.

11. Lormé E., *Nouveau manuel complet du savonnier, ou traité de la fabrication des savons*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1859, p. 20.

12. Flamm P., *Le verrier du XIX^e siècle, ou l'art de la vitrification tel qu'il est pratiqué de nos jours*, Paris, Librairie scientifique, industrielle et agricole, Eugène Lacroix éd., Librairie de la Société des ingénieurs civils, 1863, p. 16.

5. Vergnaud A., *Nouveau manuel de chimie agricole, traduit sur la cinquième édition anglaise des éléments de chimie agricole de sir Humphry Davy, avec les notes de M. John Davy sur des faits connus seulement depuis 1826*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1838, p. 209 et 212.

6. *Ibid.*, p. 213.

le cas des tanneurs. Ces derniers mettent à profit les propriétés caustiques de la chaux pour traiter les peaux afin de les transformer en cuir. La chaux grasse est la mieux adaptée à cette utilisation, bien que les sources savantes n'explicitent pas clairement ce choix. En Méditerranée occidentale et en Europe, la production de cuir a une implantation ancienne, tandis que les secteurs de la savonnerie et de la fabrication du sucre connaissent un essor important à partir de la fin du Moyen Âge (Vaschalde, 2013, 472-473). À cela s'ajoute la prise de conscience à partir du XVII^e siècle, par les verriers, de l'utilité de la chaux dans la fabrication du verre (Foy *et al.* 2000 ; Vaschalde, 2013, 470-471). Ce faisceau d'évolution de l'industrie a sans aucun doute pesé significativement sur la production de chaux grasse. Des structures de stockage de la chaux en contexte artisanal ont parfois été retrouvées par les archéologues (Bonnamour *et al.*, 2011 ; Macario, 2014) et pourraient, à l'avenir, faire l'objet d'analyses afin d'approfondir ce nouveau champ de recherches.

Des chaux « impures » pour des matériaux hydrauliques et/ou résistants

Dès l'Antiquité, la chaux grasse n'est pas la seule à être fabriquée par les chauxourniers. Les usages des chaux dites « impures » intéressent principalement le secteur du bâtiment.

Les chaux maigres, dites calciques lorsqu'elles ne contiennent pas de magnésium, ont globalement les mêmes usages que la chaux grasse, mais ont des propriétés physico-chimiques différentes. Elles foisonnent beaucoup moins qu'une chaux grasse au moment de l'extinction, et s'échauffent peu. La pâte obtenue est moins onctueuse, et s'agglutine moins aux pierres ou aux adjuvants du mortier. Les propriétés mécaniques sont, de ce fait, inférieures à celles de la chaux grasse. La chaux maigre se conserve sous l'eau, durcit à l'air¹³, et est utilisée dans le gros œuvre en bâtiment par exemple.

Les propriétés des chaux hydrauliques ont souvent été décrites dans la littérature savante au XIX^e siècle, et par les archéologues au XX^e siècle. Elles sont réputées pour leur capacité à durcir sous l'eau et à rendre possible la fabrication de mortiers étanches. Mais, contrairement à une idée reçue répandue, les mortiers fabriqués avec de la chaux hydraulique ne sont pas systématiquement plus solides que ceux confectionnés avec de la chaux aérienne (Coutelas, 2009, 17). Au moment de l'extinction, la chaux hydraulique foisonne beaucoup moins que la chaux grasse. C'est d'ailleurs à partir de ce critère que L.-J. Vicat¹⁴ avait classé les chaux

hydrauliques en trois catégories : faiblement hydrauliques, moyennement hydrauliques, et éminemment hydrauliques. De fait, la chaux hydraulique absorbe également moins d'eau que la chaux grasse lorsqu'elle est éteinte (Maravelaki-Kalaitzaki, 2007). L'identification d'une possible chaux hydraulique dans le four de Châteaubateau relance le débat sur l'origine de l'hydraulicité des mortiers anciens. Pour la majorité des spécialistes, ces mortiers hydrauliques ne doivent leur nature qu'aux adjuvants, notamment le tui-leau et la pouzzolane qui, par réaction lors du séchage, confèrent l'hydraulicité au matériau (Sánchez-Moral *et al.*, 2005 ; Pavia et Caro, 2008 ; Miriello *et al.*, 2010 et 2011). Seules quelques études ont montré la présence de minéraux caractéristiques des chaux hydrauliques dans des mortiers antiques et médiévaux (Charola *et al.*, 1984 ; Mannoni, 1994 ; Martinet et Quenée, 2000 ; Palazzo-Bertholon, 2000, 205 ; Coutelas, 2003, 232 ; Mannoni *et al.*, 2006 ; Mertens *et al.*, 2006). Toutefois, la nature hydraulique de la chaux contenue dans ces mortiers n'a jamais pu être déterminée formellement. Une étude récente réalisée sur de la chaux de fours antiques et modernes du Jura suisse a également mis en évidence une possible production de chaux hydraulique dès l'époque romaine (Adatte, 2014).

La chaux magnésienne est une chaux maigre, qui est au centre de recherches approfondies depuis quelques années. Utilisée dans des mortiers de construction, elle se distingue bien des autres types de chaux (Bläuer-Böhm et Jägers, 1996 ; Bertolini *et al.*, 2013), et ses qualités intrinsèques, associées à celles d'autres matériaux (kaolin cuit par exemple), seraient adaptées à la confection de mortiers à la résistance remarquable (Mannoni *et al.*, 2006, Mannoni, 2010), ou présentant une bonne résistance à l'eau (Bläuer-Böhm et Jägers, 1996, 225)¹⁵. Les mortiers magnésiens, attestés au cours du Moyen Âge et de l'époque moderne en Allemagne et en Italie du Nord (Bläuer-Böhm et Jägers, 1996 ; Mannoni *et al.* 2006 ; Bertolini *et al.*, 2013), résisteraient également mieux aux attaques de l'eau de mer sur les bâtiments installés sur le littoral¹⁶. Les qualités que la chaux magnésienne conférerait aux mortiers sont toutefois sujettes à débat, spécialement à cause de sa fragilité accrue face aux altérations naturelles, notamment en milieu humide (Arizzi et Cultrone, 2012). Ces mortiers favorisent également la formation de sels solubles à base de sulfates de magnésium, qui sont à l'origine de la dégradation des pierres de construction. Enfin, la chaux dolomitique est également recommandée

15. Magnier M.-D., *Nouveau manuel...*, 1864, p. 8.

13. Magnier M.-D., *Nouveau manuel...*, 1864, p. 10.

14. Vicat L.-J., *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*, Paris, chez Goujon, 1818, 97 p., XXV pl.

16. *Id.* ; Vergnaud A., *Nouveau manuel...*, 1838, p. 212 ; Château Th., *Technologie du bâtiment, spécialement destiné aux ingénieurs, architectes, entrepreneurs, conducteurs de travaux*, Paris, B. Bance-A. Morel, 1863, vol. 1, p. 351.

pour l'amendement des sols dans l'agriculture¹⁷, notamment dans les régions du nord de la France et de l'Europe.

Pour une histoire des gammes de chaux

Une mise en perspective chronologique des résultats d'analyse des chaux archéologiques n'est pas aisée. Le corpus des fours étudiés est encore réduit, ce qui constitue un écueil important. De plus, rappelons que les chaux retrouvées dans des contextes d'utilisation autres que le bâtiment n'ont encore fait l'objet d'aucune analyse. Toutefois, les résultats disponibles permettent quelques réflexions. En premier lieu, il faut noter que le produit issu des fours est en adéquation avec l'environnement alentour, qu'il soit naturel (bancs calcaires) ou non (récupération), et ce, pour toutes les périodes étudiées.

Pour l'Antiquité, bien que seulement deux fours aient été étudiés, il apparaît clairement que les chaux produites sont très diversifiées. En plus de la chaux aérienne grasse recommandée par tous les auteurs antiques, les artisans ont produit de la chaux magnésienne et de la chaux faiblement hydraulique. Certes, le caractère volontaire de ces productions reste encore à démontrer, mais il n'en demeure pas moins que les caractéristiques de ces produits ont une incidence sur leur mise en œuvre, et donc sur les gestes des artisans.

Le haut Moyen Âge, particulièrement la période mérovingienne, est réputé pour ses mortiers de pierre qualité (Coutelas, 2009, 76). Là encore, le nombre de sites étudiés est très restreint, mais l'exemple de Villeveyrac (VI^e-VII^e siècles) montre le maintien d'une technique de production de la chaux similaire à la période antique. Sans doute faut-il chercher du côté de la phase de gâchage pour expliquer la médiocre qualité des mortiers de cette époque.

Au cours du second Moyen Âge, la chaux aérienne grasse a souvent été identifiée. Elle est certainement la plus recherchée, à une époque où la production de chaux connaît un renouveau (Vaschalde, 2013, 489-498) et où les architectes redécouvrent les écrits antiques faisant véritablement l'apologie d'une chaux foisonnante et onctueuse, et donc grasse (Coutelas, 2009, 75 ; Vaschalde, 2013, 425-430). Notons toutefois que l'usage de calcaires impurs est attesté, ce qui élargit la gamme des chaux produites.

Enfin, au cours de l'époque moderne, la chaux grasse est toujours fortement représentée, mais plusieurs fours ont été alimentés avec des calcaires impurs, donnant des chaux aériennes maigres, faiblement hydrauliques ou magnésiennes. C'est à cette époque que les savants établissent les caractéristiques chimiques des calcaires, et que L. J. Vicat

« invente » la chaux hydraulique¹⁸. Sans que l'on puisse affirmer que la gamme des chaux se diversifie au cours de l'époque moderne, il n'est sans doute pas anodin que de nombreux cas de chaux non grasses soient mis en lumière au moment de l'invention de la chaux hydraulique.

5. CONCLUSION

Le traitement par DRX, MEB-EDS et pétrographie des chaux non transformées découvertes dans les fours à chaux archéologiques met en lumière une grande variété de produits fabriqués. Il éclaire tout un pan de l'économie ancienne, qui avait été abordé partiellement et uniquement par l'étude des mortiers. Cette approche complète les grands axes de la recherche actuelle portant sur la caractérisation physico-chimique des artefacts, comme la céramique, le verre, ou encore les objets métalliques. Grâce à elle, les problèmes de diffusion des matériaux pourront être abordés dans une perspective d'histoire et d'archéologie de l'économie. Toutefois, elle souffre encore, bien entendu, du trop faible nombre d'échantillons analysés. L'analyse quantitative des productions n'est donc pas encore envisageable, mais celle portant sur la qualité des chaux est désormais possible.

Parmi les trois méthodes mobilisées, la diffraction des rayons X livre les résultats les plus prometteurs, lesquels sont renforcés par l'application d'un protocole de prélèvement précis. Ainsi, dès l'Antiquité et jusqu'à l'aube de la Révolution industrielle, les chauxfourniers ont produit plusieurs types de chaux. Bien que le caractère volontaire de certaines productions reste encore à démontrer, on peut aisément distinguer deux groupes principaux de produits, que l'on retrouve dans les gammes de chaux dès l'Antiquité. Les chaux aériennes grasses d'abord, les plus « pures », sont les plus couramment identifiées dans les fours. Elles sont très recherchées, et leurs usages sont nombreux : gros œuvre et enduits fin dans le bâtiment, artisanat et industrie, agriculture... Ensuite, un autre groupe est constitué des chaux « impures » (aériennes maigres, faiblement hydrauliques, hydrauliques, magnésiennes). Leur identification dans des fours antiques et médiévaux revêt un caractère inédit. À l'exception des chaux maigres, utilisées pour du gros œuvre ordinaire le plus souvent, ces chaux sont surtout recherchées pour leurs propriétés hydrauliques et/ou leur capacité à renforcer certains matériaux de construction. Des usages dans l'agriculture sont également possibles. Les recherches ne sont pas pour autant terminées. Un développement à venir serait

17. Vergnaud A., *Nouveau manuel...*, 1838, p. 203.

18. Vicat L. J., *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*. Paris, chez Goujon, 1818, 97 p.-XXV pl.

la généralisation de l'application de la DRX à tous les fours à chaux découverts par l'archéologie, mais aussi à toutes les chaux mises au jour dans des contextes d'utilisation. À ce propos, une attention particulière devra être portée aux chaux utilisées par les tanneurs, les verriers, les savonniers, les fabricants de sucre... La massification des données ouvrira également la voie à une analyse chronologique plus approfondie. D'autres méthodes peuvent être mobilisées, comme l'analyse de la fraction soluble, la spectroscopie Raman, l'analyse de sections polies, *etc.* La mobilisation de ces outils est encore rare actuellement, mais pourrait s'avérer d'un apport important (Elsen, 2006, 1418).

L'analyse par DRX des chaux découvertes dans les fours apporte également son lot d'informations sur les chaînes opératoires de production. Elle éclaire d'un jour nouveau l'identification des matières premières, les stratégies d'exploitation, et renseigne parfois sur les températures de cuisson. Toutefois, il reste à résoudre la question du caractère volontaire de l'utilisation de certaines pierres, particulièrement dans les contextes de récupération de matériaux, très couramment rencontrés au cours de l'Antiquité tardive. Pour cela, une approche croisée archéologique et archéométrique sur les entreprises de démontage des monuments antiques est envisagée, en détaillant les gestes techniques mis en œuvre pour choisir et trier les matériaux, et en confrontant les analyses de chaux avec la nature de la matière première. Certains sites archéologiques présentent un potentiel particulièrement intéressant, car ils possèdent également des structures de consommation de la chaux dans le bâtiment (fosses de stockage et/ou gâchage), qui permettront de suivre la chaux tout au long d'une même filière économique.

Remerciements

Nous remercions particulièrement toutes les personnes, notamment les responsables d'opérations archéologiques, qui ont très aimablement fourni des échantillons de chaux à analyser : G. Brkojewitsch (Metz-Métropole), P. Chapon (Inrap), A. Duny (Cellule archéologique de l'Ardèche), D. Ollivier (Centre archéologique du Var-LA3M UMR 7298), F. Pilon (Association La Robié), V. Ropiot (Chronoterre), J. Thiriot (LA3M UMR 7298), C. Thomas, H. Tréziny (CCJ UMR 7299).

Bibliographie

- ADATTE T., 2014. Analyses minéralogiques et géochimiques, La production de chaux en Ajoie de l'époque romaine au XIX^e siècle. In J.-D. Demarez, *Recherches d'archéologie et d'histoire. Cahiers d'archéologie jurassienne* 34, Office de la culture et société jurassienne d'émulation, p. 91-93.
- ALLEN G.C., HALLAM K.R., RADONJIC M., ELTON N.J., FAREY M., ASHURST J., 2000. X-Ray diffraction and environmental electron microscopy of hydrated limes. In P. Bartos, C. Groot, J.J. Hughes (ed.), *Historic Mortars: Characteristics and Tests. Proceedings of the International RILEM Workshop*, Cachan, RILEM, p. 207-215.
- ARIZZI A., CULTRONE G., 2012. The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: The relationship between textural and physical-mechanical properties, *Cement and Concrete Research* 42, p. 818-826.
- BARTZ W., FILAR T., 2010. Mineralogical characterization of rendering mortars from decorative details of a baroque building in Koźuchów (SW Poland), *Materials characterization* 61, p. 105-115.
- BERTOLINI L., CARSANA M., GASTALDI M., LOLLINI F., REDAELLI E., 2013. Binders characterization of mortars used at different ages in the San Lorenzo church in Milan, *Materials Characterization* 80, 2013, p. 9-20.
- BISCAYE P.E., 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans, *Geological Society of America Bulletin* 76, p. 803-832.
- BLÄEUR-BÖHM C., JÄGERS E., 1996. Analysis and recognition of dolomitic lime mortars. In H. Bearat, M. Fuchs, M. Maggetti, D. Paunier (dir.), *Roman wall painting : materials, techniques, analysis and conservation. Proceedings of the International Workshop on Roman Wall Painting*, Fribourg, p. 223-235.
- BÖKE H., AKKURT S., 2003. Ettringite formation in historic bath brick-lime plasters. *Cement and Concrete Research* 33, p. 1457-1464.
- BONNAMOUR G., VASCHALDE Chr., TISSOT M., 2011. De la bastide de Beauvezet à la Verrerie entre la fin du Moyen Âge et le XVII^e siècle : artisanat du verre dans la forêt domaniale de Cadarache (Bouches-du-Rhône), *Archéologie du Midi Médiéval* 29, p. 227-240.
- BRKOJEWITSCH G., ASSELIN G., BELLAVIA V., DAOULAS G., MARQUÉ S., NAJI S., SEDLBAUER S., 2013. *Laquenexy, Moselle, « La Noiseraie » : un ensemble funéraire, des bâtiments et des structures d'équipements du Haut-Empire, deux bâtiments et des fosses du haut Moyen Âge et un four à chaux du Moyen Âge classique*, rapport final d'opération, Metz, Pôle archéologie préventive Metz Métropole, 338 p.

- CHAPON P. (dir.), 2012. *Var, Cuers, Pas Redon. L'évolution d'une agglomération rurale durant l'Antiquité*, rapport de fouille, Inrap, 391 p.
- CHAROLA A.E., DUPAS M., SHERYLL R.P., FREUND G.G., 1984. Characterization of ancient Mortars: chemical and Instrumental Methods, *Scientific Methodologies applied to Works of Art, Proceedings of the Symposium, Florence, Italy, 2-5 May 1984*, p. 28-33.
- COUTELAS A., 2003. *Pétoarchéologie du mortier de chaux gallo-romain. Essai de reconstitution et d'interprétation des chaînes opératoires : du matériau au métier antique*, thèse de doctorat soutenue à l'université Paris I-Panthéon-Sorbonne, 479 p.
- COUTELAS A. (dir.), 2009. *Le mortier de chaux*, Paris, Errance, 159 p.
- COUTELAS A., GODARD G., BLANC P., PERSON A., 2004. Les mortiers hydrauliques : synthèse bibliographique et premiers résultats sur des mortiers de Gaule romaine, *Revue d'archéométrie* 28, p. 127-139.
- DEMIANS D'ARCHIMBAUD G., 1980. *Les fouilles de Rougiers. Contribution à l'archéologie de l'habitat rural médiéval en pays méditerranéen*, Paris, éd. du CNRS, 724 p.
- DUNY A., BROCHIER J.-L., GIRAUD Y., 2011. *Site du Razal, Vallon Pont d'Arc, Projet d'Espace de Restitution de la Grotte Chauvet (Ardèche, Rhône-Alpes)*, Rapport de Diagnostic, Cellule archéologique du Conseil général de l'Ardèche.
- DUPAS M., 1982. L'analyse des mortiers et enduits des peintures murales et des bâtiments anciens, *Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of historic Building*, Rome, p. 281-295.
- ELSEN J., 2006. Microscopy of historic mortars – a review, *Cement and Concrete Research* 36, p. 1416-1424.
- ERAMO G., MAGGETTI M., 2013. *Pottery kiln and drying oven from Aventicum (2nd century AD, Ct. Vaud, Switzerland): Raw materials and temperature distribution*, *Applied Clay Science* 82, p. 16-23.
- FERDIÈRE A., 1999. *La géologie, les sciences de la terre*, Paris, Errance, 167 p.
- FOUCAULT A., RAOULT J.-F., 2010. *Dictionnaire de géologie. Géophysique, préhistoire, paléontologie, pétrographie, minéralogie*, Paris, Dunod, 388 p.
- FOY D., PICON M., VICHY M., 2000. Les matières premières du verre et la question des produits semis-finis. Antiquité et Moyen Âge. In P. Pétrequin, Ph. Fluzin, J. Thiriot, P. Benoît (dir.), *Arts du feu et productions artisanales, XX^e Rencontres Internationales d'Archéologie et d'histoire d'Antibes*, Antibes, éd. APDCA, p. 419-432.
- FRIZOT M., 1975. *Mortiers et enduits peints antiques, étude technique et archéologique*. Université de Dijon, faculté des Sciences humaines, Centre de recherches sur les techniques gréco-romaines, 351 p.-XXVI pl.
- GRAS M., TREZINY H., 2009. L'artisanat à Megara Hyblaea. In J.-P. Brun (dir.), *Artisanats antiques d'Italie et de Gaule. Mélanges offerts à Maria Francesca Buonaiuto*, Naples, Centre Jean Bérard, coll. « Centre Jean Bérard; 32 », p. 87-98.
- GUALTIERI A., BERTOLANI M., 1992. Mullite and cristobalite formation in fired products starting from halloysitic clay, *Applied Clay Science* 7, p. 251-262.
- JADOT E., SCHIAVON N., MANSO M., 2016. The ceramics of Malpaís of Zacapu, Michoacán, Mexico, during the Early and Middle Postclassic periods (900-1450 AD): Micro-chemical characterization of surface paintings, *Spectrochimica Acta Part B* 119, p. 10-16.
- LAZZARINI L., VERITA M., 2015. First evidence for 1st century AD production of Egyptian blue frit in Roman Italy, *Journal of Archaeological Science* 53, p. 578-585.
- MACARIO R., 2014. Béziers – Îlot des Chaudronniers, *Bilan scientifique régional Languedoc-Roussillon*, 133-136.
- MANNONI T., 1994. *Caratteri costruttivi dell'edilizia storica*, Gênes, Escum, 270 p.
- MANNONI T., 2010. Tra archeologia, empiria e scienza: una proposta per la classificazione delle resistenze delle malte, *Forum italiano Calce. Arkos. Scienza e restauro* 22, p. 63-67.
- MANNONI T., PESCE G., VECCHIATINI R., 2006. Mortiers de chaux dolomitique avec adjonction de kaolin cuit : l'expérience génoise, *ArchéoSciences* 30, p. 67-79.
- MARAVELAKI-KALAITZAKI P., 2007. Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry, *Cement and Concrete Research* 37, p. 283-290.
- MARENGO E., ACETO M., ROBOTTI E., LIPAROTA M.C., BOBBA M., PANTO G., 2005. Archaeometric characterisation of ancient pottery belonging to the archaeological site of Novalesa Abbey (Piedmont, Italy) by ICP-MS and spectroscopic techniques coupled to multivariate statistical tools, *Analytica Chimica Acta* 537, p. 359-375.
- MARTINET G., QUENÉE B., 2000. Proposal for a useful methodology for the study of ancient mortars. In P. Bartos, C. Groot, J. J. Hughes (ed.), *Historic Mortars: Characteristics and Tests. Proceedings of the International RILEM Workshop*, Cachan, RILEM, 81-91.
- MERCIER J. (dir.), 2011. *Auxerre. Yonne, Bourgogne. Place des Véens, DFS Fouille préventive*, SRA Bourgogne-Centre d'études médiévales d'Auxerre-Archéodunum SAS, 2 vol., 307-102 p.
- MERTENS G., ELSEN J., LADURON D., BRULET R., 2006. Minéralogie des silicates de calcium présents dans des mortiers anciens de Tournai, *ArchéoSciences* 30, p. 61-65.
- MIRIELLO D., BARCA D., BLOISE A., CIARALLO A., CRISCI G.M., DE ROSE T., GATTUSA C., GAZINEO F., LA RUSSA M.F., 2010. Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases

- by compositional data analysis, *Journal of Archaeological Science* 37, p. 2207-2223.
- MIRIELLO D., BLOISE A., CRISCI G. M., APOLLARO C., LA MARCA A., 2011. Characterisation of archaeological mortars and plasters from Kyme (Turkey), *Journal of Archaeological Science* 38, p. 794-804.
- MOROPOULOU A., BAKOLAS B., BISBIKOU K., 1995. Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques, *Thermochimica Acta* 269/270, p. 779-795.
- MOROPOULOU A., BAKOLAS B., BISBIKOU K., 2000. Investigation of the technology of historic mortars, *Journal of Cultural Heritage* 1, p. 45-58.
- PALAZZO-BERTHOLON B., 2000. Archéologie et archéométrie des mortiers et des enduits médiévaux. Etude critique de la bibliographie, *Archéologie médiévale* XXIX, p. 191-216.
- PAVIA S., CARO S., 2008. An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material, *Construction and Building Materials* 22, p. 1807-1811.
- PÉRINET G., COURTOIS L., 1983. Evaluation des températures de cuisson de céramiques et de vaisselles blanches néolithiques de Syrie, *Bulletin de la Société préhistorique française* 80-5, p. 157-160.
- ROPIOT V. (dir.), 2014. *Le vallon de Pié Fouquet à Rognes (Bouches-du-Rhône), région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, rapport final d'opération, fouilles préventives, Chronoterre Archéologie, 372 p.
- SÁNCHEZ-MORAL S., LUQUE L., CAÑAVERAS J.C., SOLER V., GARCIA-CUINEA J., APARICIO A., 2005. Lime pozzolana mortars in Roman catacombs: composition, structures and restoration, *Cement and Concrete Research* 35, p. 1555-1565.
- SANJURJO-SANCHEZ J., TRINDADE M.J., BLANCO-ROTEA R., BENAVIDES GARCIA R., FERNANDEZ MOSQUERA D., BURDIDGE C., PRUDENCIO M.I., DIAS M.I., 2010. Chemical and mineralogical characterization of historic mortars from the Santa Eulalia de Bóveda temple, NW Spain, *Journal of Archaeological Science* 37, p. 2346-2351.
- SAVE S., BLACK S., DRIARD C., MAVÉRAUD-TARDIVEAU H., 2013. Four à chaux : l'identification par diffraction X (XRD), *XIXe Colloque d'Archéométrie du GMPCA*, 22-26 avril 2013, Université de Caen-Basse-Normandie-CRAHM, poster.
- SCHULTZ L.G., 1964. *Quantitative Interpretation of Mineralogical Composition X-ray and Chemical Data for the Pierre Shale*, United States Geological Survey, Professional Paper, 391-C, 31 p.
- SUMERA F., VEYRAT E., 1997. Les fours à chaux gallo-romains de « Brétinoust », commune de Sivry-Courtry (Seine-et-Marne), *Revue archéologique du centre de la France* 36, p. 99-130.
- TESCH V., MIDDENDORF B., 2006. Occurrence of thaumasite in gypsum lime mortars for restoration, *Cement and Concrete Research* 36, p. 1516-1522.
- THIRIOT J., 2005-2006. Les fours à chaux à deux foyers superposés du XIII^e siècle de Saint-Blaise-de-Bauzon à Bollène (Vaucluse) : une autre façon de cuire la pierre, *Archéologie du Midi Médiéval* 23-24, p. 247-263.
- THOMAS Cl., 2009. *Le four à chaux du bois de la Marcouline. Cassis, Bouches-du-Rhône. Rapport de sondage programmé 2008*, rapport final d'opération, SRA PACA, 15 p.
- VAN HEES R.P.J., WIJFFELS T.J., VAN DER KLUGT L.J.A.R., 2003. Thaumasite swelling in historic mortars: field observations and laboratory research, *Cement & Concrete Composites* 25, p. 1165-1171.
- VASCHALDE C., 2008. *Le four à chaux PEY4 A1. Peynier – quartier de Bel Homme. Bouches-du-Rhône*, rapport de sondage programmé, 30 p., 6 pl., inédit.
- VASCHALDE C., 2013. *L'art de cuire la pierre en France méditerranéenne à la fin du Moyen Âge. Approche interdisciplinaire d'un artisanat méconnu : la chaufournerie*, thèse de doctorat soutenue à l'université d'Aix-Marseille, Durand A., Thiriot J. (dir.), 3 vol., 1004-478 p.
- VASCHALDE C., DURAND A., FIGUEIRAL I., THIRIOT J., 2013. Charcoal analysis of lime kiln remains in Southern France : an original process of medieval and modern traditional lime burning, *Proceedings of the Fourth International Meeting of Anthracology, Brussels, 8-13 september 2008, Royal Belgium Institute of Natural Sciences* (Damblon Fr., Court-Picon M. éd.), *BAR International Series* 2486, p. 251-258.
- VASCHALDE C. (dir.), 2014. *Les Marouch – Villeveyrac (Hérault). Un four à chaux et une installation de boulanger du haut Moyen Âge*, rapport final d'opération, SRA Languedoc-Roussillon-Communauté de communes Nord du Bassin de Thau, 170 p.
- VASCHALDE C. THIRIOT J., RAMMEH M., CHEHAIBI Z., 2015. Fours à chaux et chaufourniers et Méditerranée occidentale : ethnoarchéologie de l'art de cuire la pierre. In F. Jarray (éd.), *Métiers, savoir-faire et vie professionnelle dans le monde méditerranéen d'après les sources archéologiques. Actes du II^e colloque international de l'Institut Supérieur des Métiers du Patrimoine de Tunisie, Tunis, 2-4 décembre 2010*, Tunis, Institut Supérieur des Métiers du Patrimoine, p. 185-198.