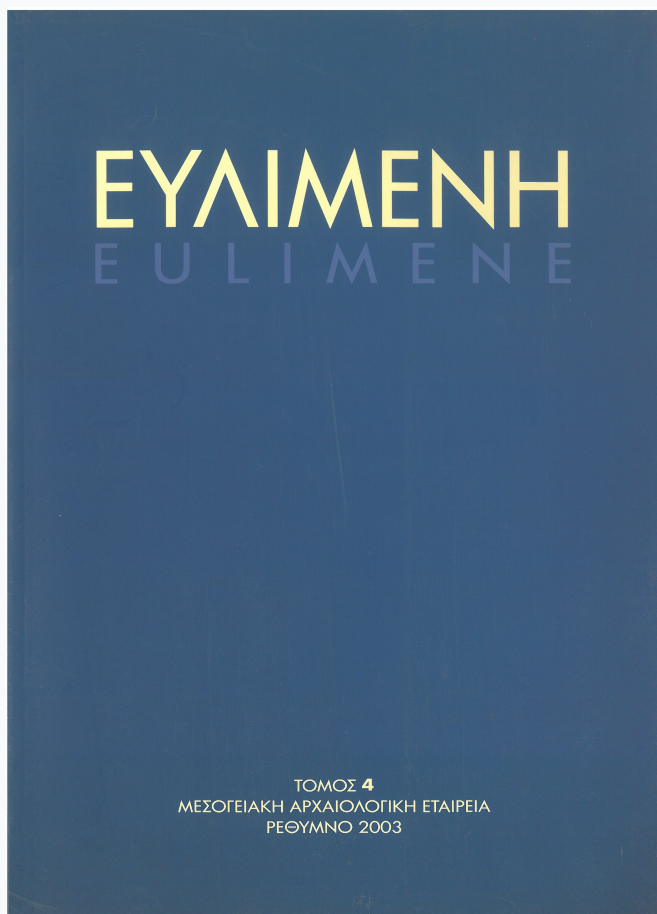


EULIMENE

Vol 4 (2003)

EULIMENE 4 (2003)



Circiter tertia parte ponderis (Vitruve 2, 5), l'existence d'une chaux hydraulique dans l'architecture romaine,

Frédéric Davidovits

doi: [10.12681/eul.32755](https://doi.org/10.12681/eul.32755)

ΕΥΛΙΜΕΝΗ

ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ,
ΤΗΝ ΕΠΙΓΡΑΦΙΚΗ, ΤΗ ΝΟΜΙΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΠΥΡΟΛΟΓΙΑ

Τόμος 4
Μεσογειακή Αρχαιολογική Εταιρεία
Ρέθυμνο 2003

ΕΚΔΟΣΕΙΣ

ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΗ

ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ

Π. Μανουσάκη 5–Β. Χάλη 8

GR 741 00–Ρέθυμνο

PUBLISHER

MEDITERRANEAN

ARCHAEOLOGICAL SOCIETY

P. Manousaki 5–V. Chali 8

GR 741 00–Rethymno

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ–ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ

Δρ. Νίκος Λίτινας (Ρέθυμνο)

Δρ. Μανόλης Ι. Στεφανάκης (Ρόδος)

ΒΟΗΘΟΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Δρ. Δήμητρα Τσαγκάρη (Αθήνα)

PUBLISHING DIRECTORS**EDITORS–IN–CHIEF**

Dr. Nikos Litinas (Rethymno)

Dr. Manolis I. Stefanakis (Rhodes)

ASSISTANT TO THE EDITORS

Dr. Dimitra Tsangari (Athens)

Η Μεσογειακή Αρχαιολογική Εταιρεία και οι Εκδότες του περιοδικού
ευχαριστούν θερμά τους Roger and Polly Beecroft, York, England και τον Σύλλογο Καθηγητών –
Ιδιοκτητών Κέντρων Ξένων Γλωσσών (PALSO) Χανίων
για τις χορηγίες τους στη δαπάνη της έκδοσης.

Mediterranean Archaeological Society and the Editors wish to thank
Roger and Polly Beecroft, York, England and the Panhellenic Association of Language School
Owners (PALSO) of Chania for their sponsorship.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθ. Πέτρος Θέμελης (Ρέθυμνο)
Καθ. Νίκος Σταμπολίδης (Ρέθυμνο)
Δρ. Alan W. Johnston (Λονδίνο)
Καθ. François Lefèvre (Παρίσι)
Καθ. Άγγελος Χανιώτης (Χαϊδελβέργη)
Δρ. Μανόλης Ι. Στεφανάκης (Ρόδος)
Δρ. Ιωάννης Τουράτσογλου (Αθήνα)
Δρ. Νίκος Λίτινας (Ρέθυμνο)
Καθ. Σοφία Καμπίτση (Ρέθυμνο)
Καθ. Αναγνώστης Αγγελαράκης (Adelphi)
Καθ. Σταύρος Περεντίδης (Βόλος)

ADVISORY EDITORIAL BOARD

Prof. Nikos Stampolidis (Rethymno)
Prof. Petros Themelis (Rethymno)
Dr. Alan W. Johnston (London)
Prof. François Lefèvre (Paris)
Prof. Angelos Chaniotis (Heidelberg)
Dr. Manolis I. Stefanakis (Rhodes)
Dr. Ioannis Touratsoglou (Athens)
Dr. Nikos Litinas (Rethymno)
Prof. Sophie Kambitsis (Rethymno)
Prof. Anagnostis Agelarakis (Adelphi)
Prof. Stavros Perentidis (Volos)

Η ΕΥΛΙΜΕΝΗ είναι μία επιστημονική περιοδική έκδοση που περιλαμβάνει μελέτες στην Κλασική Αρχαιολογία, την Επιγραφική, τη Νομισματική και την Παπυρολογία εστιάζοντας στον Ελληνικό και Ρωμαϊκό κόσμο της Μεσογείου από την Υστερομινωική / Υπομινωική / Μυκηναϊκή εποχή (12^{ος} / 11^{ος} αι. π.Χ.) έως και την ύστερη αρχαιότητα (5^{ος} / 6^{ος} αι. μ.Χ.).

Η ΕΥΛΙΜΕΝΗ περιλαμβάνει επίσης μελέτες στην Ανθρωπολογία, Παλαιοδημογραφία, Παλαιοπεριβάλλον, Παλαιοβοτανολογία, Ζωοαρχαιολογία, Αρχαία Οικονομία και Ιστορία των Επιστημών, εφόσον αυτές εμπίπτουν στα προαναφερθέντα γεωγραφικά και χρονικά όρια. Ευρύτερες μελέτες στην Κλασική Φιλολογία και Αρχαία Ιστορία θα γίνονται δεκτές, εφόσον συνδέονται άμεσα με μία από τις παραπάνω επιστήμες.

Παρακαλούνται οι συγγραφείς να λαμβάνουν υπόψη τους τις παρακάτω οδηγίες:

1. Οι εργασίες υποβάλλονται στην Ελληνική, Αγγλική, Γερμανική, Γαλλική ή Ιταλική γλώσσα. Κάθε εργασία συνοδεύεται από μια περίληψη περίπου 250 λέξεων σε γλώσσα άλλη από εκείνη της εργασίας.
2. Συντομογραφίες δεκτές σύμφωνα με το *American Journal of Archaeology, Numismatic Literature*, J.F. Oates *et al.*, *Checklist of Editions of Greek and Latin Papyri, Ostraca and Tablets, ASP*.
3. Τα γραμμικά σχέδια γίνονται με μαύρο μελάνι σε καλής ποιότητας χαρτί με ξεκάθαρους χαρακτήρες, ώστε να επιδέχονται σμίκρυνση. Οι φωτογραφίες είναι ασπρόμαυρες, τυπωμένες σε γυαλιστερό χαρτί. Όλα τα εικονογραφικά στοιχεία είναι αριθμημένα σε απλή σειρά.
4. Οι εργασίες στέλνονται σε δύο εκτυπωμένα αντίτυπα συνοδευόμενα από το κείμενο σε δισκέτα ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Είναι υποχρέωση του κάθε συγγραφέα να εξασφαλίζει γραπτή άδεια για την αναπαραγωγή υλικού που έχει δημοσιευτεί αλλού ή είναι αδημοσίευτο.

Οι συγγραφείς θα λαμβάνουν δέκα ανάτυπα και έναν τόμο του περιοδικού. Επιπλέον ανάτυπα θα μπορούν να αγοραστούν.

Συνδρομές – Συνεργασίες – Πληροφορίες:

Μεσογειακή Αρχαιολογική Εταιρεία, Π. Μανουσάκη 5 – Β. Χάλη 8, Ρέθυμνο – GR 74100

Δρ. Νίκος Λιτinas, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φιλολογίας, Ρέθυμνο – GR 74100

Δρ. Μανώλης Ι. Στεφανάκης, Καλύβες – Αποκορώνου, Χανιά – GR 73003

EULIMENE is a referred academic periodical which contains studies in Classical Archaeology, Epigraphy, Numismatics, and Papyrology, with particular interest in the Greek and Roman Mediterranean world. The time span covered by EULIMENE runs from the Late Minoan / Sub Minoan / Mycenaean period (12th / 11th cent. BC) through to the late Antiquity (5th / 6th cent. AD).

EULIMENE will also welcome studies on anthropology, palaiodemography, palaeo-environmental, botanical and faunal archaeology, the ancient economy and the history of science, so long as they conform to the geographical and chronological boundaries noted. Broader studies on Classics or Ancient History will be welcome, though they should be strictly linked with one or more of the areas mentioned above.

It will be very much appreciated if contributors consider the following guidelines:

1. Contributions should be in either of the following languages: Greek, English, German, French or Italian. Each paper should be accompanied by a summary of about 250 words in one of the above languages, other than that of the paper.
2. Accepted abbreviations are those of *American Journal of Archaeology, Numismatic Literature*, J.F. Oates *et al.*, *Checklist of Editions of Greek and Latin Papyri, Ostraca and Tablets, ASP*.
3. Line drawings should be in black ink on good quality paper with clear lettering, suitable for reduction. Photographs should be glossy black-and-white prints. All illustrations should be numbered in a single sequence.
4. Please send two hard copies of your text and one version on computer disc.

It is the author's responsibility to obtain written permission to quote or reproduce material which has appeared in another publication or is still unpublished.

Ten offprints of each paper, and a volume of the journal will be provided to the contributors free of charge. Additional offprints may be purchased.

Subscriptions – Contributions – Information:

Mediterranean Archaeological Society, P. Manousaki 5 – V. Chali 8, Rethymno – GR 74100

Dr. Nikos Litinas, University of Crete, Department of Philology, Rethymno – GR 74100

Dr. Manolis I. Stefanakis, Kalives – Apokoronou, Chania – GR 73003

web : <http://www.phl.uoc.gr/eulimene/>

mail : eulimene@mail.com

Περιεχόμενα
EYΛIMENH 4 (2003)

List of contents
EULIMENE 4 (2003)

Περίληψεις / Summaries / Zusammenfassungen / Sommaires / Riassunti	5
Frédéric Davidovits , <i>Circiter tertia parte ponderis</i> (Vitruve II, 5).....	9
Christina de Domingo - Alan Johnston , A petrographic and chemical study of east Greek and other archaic transport amphorae	27
Dimitris Paleothodoros , The Pithos painter.....	61
Nicholas Victor Sekunda , The stele of Thersagoras of Polyrrhenia from Demetrias	77
Βίλη Αποστολάκου «...ΚΑΙ ΛΑΤΟΣ ΓΑΡ ΕΝΕΓΚΑΤΟ ΤΟΝΔΕ ...» ή Λατίων Προσωπογραφία	81
Πάυλος Χρυσοστόμου , Συνεισφορές σε λατρείες θεοτήτων και ηρώων από την Βοττιαία και την Περία της Μακεδονίας.....	135
Georgia Alexopoulou, Dimitra Tsangari , Deux trésors hellénistiques de Psélalonia de Patras.....	153
Nahum Cohen , A customhouse receipt	163
Despina Iosif , Caesar the warrior versus Jesus the peacemaker?.....	167
Chryssi Bourbou , A survey of neoplastic diseases in ancient and medieval Greek populations.....	181
Stelios Psaroudakes , Archaeomusicology and Ethnomusicology in dialogue.....	189

Περίληψεις / Summaries / Zusammenfassungen / Sommaires / Riassunti

Frédéric Davidovits, *Circiter tertia parte ponderis* (Vitruve 2, 5), l'existence d'une chaux hydraulique dans l'architecture romaine, EYAIMENH 4 (2003), 9-25

Circiter tertia parte ponderis (Vitruve 2, 5), the existence of an hydraulic lime in the Roman architecture. In his treaty on architecture, Vitruve (2, 5) explains how to make lime from a particular limestone. In 2, 5, 3, he indicates that during lime calcination, the limestone lost a third of its weight [*circiter tertia parte ponderis*]. One deducts that the original limestone contains 20% of silicates and the lime thus obtained is of medium hydraulicity. Vitruve recommends for the construction of walls to use a lime made from a compact and rather hard siliceous limestone [*ex spisso et duriore*], what implies the hydraulic character required for such an usage. For coatings [*in tectoriis*], the lime hardens by air and is made from porous stone [*ex fistuloso*].

Christina de Domingo and Alan Johnston, A petrographic and chemical study of east Greek and other archaic transport amphorae, EYAIMENH 4 (2003), 27-60

Πετρογραφική και χημική μελέτη διαφόρων τύπων ελληνικών αρχαϊκών αμφορέων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας σειράς πετρογραφικών αναλύσεων διαφόρων τύπων αρχαϊκών ελληνικών αμφορέων, παράλληλα με κάποιες χημικές αναλύσεις. Σκοπός είναι να ελεγχθεί η πετρογραφική σύσταση των αγγείων συγκριτικά με την τυπολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί από μη-συστηματικές μελέτες. Τα αποτελέσματα στηρίζουν σε σημαντικό βαθμό τις προηγούμενες έρευνες, και παράλληλα καταδεικνύουν ορισμένες ενδιαφέρουσες περιοχές για μελλοντική έρευνα, ειδικά όσον αφορά τους τύπους που αποδίδονται στη Λακωνία, τη Λέσβο και την Κόρινθο.

Dimitris Paleothodoros, The Pithos painter, EYAIMENH 4 (2003), 61-76

Ο Ζωγράφος του Πίθου. Ο Ζωγράφος του Πίθου είναι ο χειρότερος αθηναίος αγγειογράφος του ύστερου 6^{ου} αι. π.Χ., του οποίου όμως οι κύλικες γνωρίζουν πολύ μεγάλη διάδοση στην Μεσόγειο. Το αγαπημένο του θέμα, ο συμποσιαστής που φορά σκυθικό σκούφο, απαντά σε όλες τις περιοχές όπου βρίσκουμε αγγεία του ζωγράφου, ιδιαίτερα όμως στην Ανατολή και τη Μαύρη Θάλασσα. Αφήνοντας ανοικτή την πραγματική ταυτότητα του συμποσιαστή, ο ζωγράφος επιτρέπει διαφορετικές ερμηνείες από τους αγοραστές των αγγείων, που ανταποκρίνονται στις τοπικές ιδιαιτερότητες.

Nicholas Victor Sekunda, The stele of Thersagoras of Polyrrhenia from Demetrias, EYAIMENH 4 (2003), 77-80

Η στήλη το Θερσαγόρα, ενός Κρητικού από την Πολυρρήνια, η οποία βρέθηκε στην Δημητριάδα, χρονολογείται συμβατικά γύρω στο 200 π.Χ. Ο Θερσαγόρας παριστάνεται με πλήρη στρατιωτική εξάρτηση. Στο παρόν άρθρο υποστηρίζεται ότι ο Θερσαγόρας ανήκε στο συμμαχικό τάγμα που εστάλη από «τους Πολυρρηνίους και τους συμμάχους τους» στον Φίλιππο Ε' της Μακεδονίας το 220 π.Χ. Ο Θερσαγόρας πιθανότατα σκοτώθηκε και τάφηκε στη Δημητριάδα κατά τη διάρκεια της παραμονής του στρατού των Αντιγονιδών εκεί, πριν μεταβεί στην Εύβοια και κατεθυνθεί στη συνέχεια στην Κόρινθο, στις αρχές του 219 π.Χ. Άλλωστε, η στήλη δεν είναι προσεγγμένη και αυτό ίσως να υποδηλώνει ότι κατασκευάστηκε βιαστικά, ενώ η κρητική μονάδα προήλαυε.

Βίλη Αποστολάκου «...ΚΑΙ ΛΑΤΟΣ ΓΑΡ ΕΝΕΓΚΑΤΟ ΤΟΝΔΕ ...» ή Λατίων Προσωπογραφία, ΕΥΛΙΜΕΝΗ 4 (2003), 81-133

«...ΚΑΙ ΛΑΤΟΣ ΓΑΡ ΕΝΕΓΚΑΤΟ ΤΟΝΔΕ ...» or the *prosopography of the Latians*. The inscriptions found in Lato, in Agios Nikolaos, the ancient Kamara, and in other areas that according to epigraphic evidence belonged to the territory of Lato are the unique source for the names of the Latoans. Most of the inscriptions are currently kept in the Archaeological Museums of Herakleion and of Agios Nikolaos, some in Museums outside of Crete, while a certain number recorded up to the end of last century, are lost and have not been located yet. The inscriptions in their vast majority have been dated to the 2nd cent. B.C. and moreover to its last quarter.

The names of the Latoans concentrated from seventy-three inscriptions are quoted in alphabetical order. In a total of 279 indexed names, not including twenty-six that are incomplete, we come across of 181 different Latoan names. Of those names at least eighty belong to the Kosmoi, the magistrates elected from the four ruling clans, or the members of the board of Eunomia.

The number of preserved female names, which in their majority come from funerary inscriptions, is strikingly lower than that of males. In a total of thirty-four, apart from four not restored, twenty-five are different female names.

Apart from the Latoans' names and their patronymics, wherever they are mentioned, known information about these persons is given briefly; their status, provided that they possessed public office, their activity, their possible relationship with the other persons of the list and finally the date of the inscriptions in which they are attested.

Παύλος Χρυσοστόμου, Συνεισφορές σε λατρείες θεοτήτων και ηρώων από τη Βοττιαία και την Πιερία της Μακεδονίας, ΕΥΛΙΜΕΝΗ 4 (2003), 135-152

Contributions on the cults of gods and heroes from Bottiea and Pieria in Macedonia. In this paper new pieces of information are presented concerning cults of gods and heroes from Bottiea and Pieria in «Lower Macedonia», the center of the Macedonian Kingdom: on the cults of 1) the Muses in Pella, 2) Aeolus and Graia in Pella, 3) Hermes and Demeter in Kyrros, 4) Eileithyia and Artemis Eileithyia-Lochia in Pydna.

Γεωργία Ζ. Αλεξοπούλου και Δήμητρα Τσαγκάρη, Deux trésors hellénistiques de Pséalaonia de Patras, ΕΥΛΙΜΕΝΗ 4 (2003), 153-162

Δύο ελληνιστικοί θησαυροί από τα Ψηλαλώνια Πατρών. Το 1990, οι ανασκαφές της ΣΤ΄ ΕΠΚΑ στα Ψηλαλώνια Πατρών έφεραν στο φως μία σειρά οικοδομημάτων από τα κλασικά ως τα υστερορωμαϊκά χρόνια. Τα πλουσιότερα στρώματα κάλυπταν την ελληνιστική και ρωμαϊκή περίοδο. Σε οικία της ελληνιστικής φάσης, βρέθηκαν δύο «θησαυροί» σε διπλανά δωμάτια, εκ των οποίων ο πρώτος βρέθηκε μέσα σε ηθμωτό αγγείο και περιείχε 57 νομίσματα: 1 αργυρό τριώβολο της Αχαϊκής Συμπολιτείας και 56 χάλκινα (14 του Αντιγόνου Γονατά, 39 του Πτολεμαίου Γ΄ του τύπου 1000 του Σβορώνου και 3 αρκετά φθαρμένα). Ο δεύτερος «θησαυρός», που βρέθηκε μέσα σε άωτο σκυφίδιο, περιείχε 8 νομίσματα, 6 αργυρά (1 δραχμή Χαλκίδος και 5 τριώβολα Αχαϊκής Συμπολιτείας) και 2 χάλκινα (1 Πτολεμαίου Γ΄ και 1 αρκετά φθαρμένο). Οι δύο αυτοί «θησαυροί», με ίδιο αλλά αντίστροφης αναλογίας περιεχόμενο και χρονολογία απόκρυψης την περίοδο 165-147 π.Χ., προστίθενται στον μακρύ κατάλογο των «θησαυρών» που απεκρύβησαν στην Πελοπόννησο και την Δυτική Ελλάδα γενικότερα, μέσα στο κλίμα αναταραχής που επικράτησε μετά τη μάχη της Πύδνας.

Nahum Cohen, A customshouse receipt ΕΥΛΙΜΕΝΗ 4 (2003), 163-165

Απόδειξη πληρωμής ενός φόρου, της ερημοφυλακίας, στην πύλη της Σοκνοπαίου Νήσου του Αρσινοΐτη νομού.

Despina Iosif, Caesar the warrior versus Jesus the peacemaker?, EYΛIMENH 4 (2003), 167-180

Πολεμοχαρής Καίσαρ εναντίον ειρηνιστή Ιησού; Οι πρώτοι Χριστιανοί ένιωθαν έντονη απέχθεια για τον πόλεμο και τη βία και απέφευγαν συστηματικά να στρατευτούν. Προτιμούσαν να πεθάνουν παρά να προδώσουν τις αρχές τους. Αυτή την εικόνα είχαν σχηματίσει οι Βυζαντινοί για τους Χριστιανούς των τριών πρώτων αιώνων. Η ίδια εικόνα παραμένει αρκετά ισχυρή μέχρι σήμερα. Εξακολουθούμε να αρεσκομάστε να επικαλούμαστε την «αγνότητα» των πρώτων Χριστιανών. Ενοχοποιούμε τον αυτοκράτορα Κωνσταντίνο ότι τάχα αυτός ευθύνεται για τον ιδεολογικό ξεπεσμό της εκκλησίας και την διεξαγωγή πολέμων από Χριστιανούς.

Η πραγματικότητα θα πρέπει να ήταν πιο πολύπλοκη απ' όσο την φανταζόμαστε. Προσεχτική μελέτη των πηγών αποκαλύπτει ότι υπήρχαν πολλές στάσεις των Χριστιανών απέναντι στη βία, στον πόλεμο και στη στρατιωτική θητεία. Φαίνεται όμως, πως η πλειονότητα των Χριστιανών δεν αντιμετώπιζε ούτε τον πόλεμο, ούτε τη στρατιωτική θητεία με καχυποψία και δεν απέφευγε να καταταγεί. Οι εθνικοί δεν είχαν θορυβηθεί και δεν είχαν λόγο να θορυβηθούν. Οι Χριστιανοί δεν αποτελούσαν απειλή ούτε στη θεωρία, ούτε στην πράξη. Αντίθετα, στήριζαν την πολιτική εξουσία. Μονάχα μια μικρή μερίδα Χριστιανών αντιδρούσε στην ιδέα της διεξαγωγής πολέμων από Χριστιανούς και συμμετοχής Χριστιανών σ' αυτούς. Είτε επειδή διέβλεπε κινδύνους από τις ειδωλολατρικές πρακτικές του ρωμαϊκού στρατού, είτε επειδή θεωρούσε ότι ένας Χριστιανός δεν επιτρέπεται να σκοτώνει, είτε επειδή επιδίωκε να αμφισβητήσει την πολιτική εξουσία.

Chryssa Bourbou, A survey of neoplastic diseases in ancient and medieval Greek populations, EYΛIMENH 4 (2003), 181-188

Επισκόπηση των νεοπλασιών στον αρχαίο και μεσαιωνικό ελληνικό πληθυσμό. Για τη διάγνωση των νεοπλασιών στους αρχαιολογικούς πληθυσμούς βασιζόμαστε σε γραπτές πηγές, απεικονίσεις και ανθρωπολογικά κατάλοιπα. Αν και ελάχιστα έργα τέχνης αναπαριστούν αναμφισβήτητες περιπτώσεις νεοπλασιών, πληθώρα ιατρικών κειμένων, ήδη από την εποχή του Ιπποκράτη και του Γαληνού, αναφέρονται στη συγκεκριμένη παθολογία. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται όλες οι έως τώρα γνωστές ή δημοσιευμένες περιπτώσεις για την Ελλάδα από την αρχαιότητα ως στον ύστερο μεσαίωνα.

Stelios Psaroudakes, Archaeomusicology and Ethnomusicology in dialogue, EYΛIMENH 4 (2003), 189-200

Αρχαιομουσικολογία και Εθνομουσικολογία. Το συνέδριο στο οποίο παρουσιάστηκε η παρούσα εισήγηση, είχε θέμα του το «διάλογο» ανάμεσα στις επιστήμες αρχαιολογία και ανθρωπολογία. Στο παρόν άρθρο εξετάζεται ένα επί μέρους ζήτημα, το κατά πόσον η εθνομουσικολογία, επιστήμη βαθύτατα επηρεασμένη από την ανθρωπολογία τα τελευταία χρόνια, έχει με τη σειρά της επηρεάσει την έρευνα στο πεδίο της αρχαίας μουσικής, ιδιαίτερα σε εκείνο της ελληνικής. Το συμπέρασμα είναι ότι η εθνομουσικολογία όχι απλώς επηρέασε την αρχαιομουσικολογία, αλλά άλλαξε άρδην την οπτική των επιστημόνων στον τομέα αυτόν σε βαθμό που να μην θεωρείται πλέον δόκιμη η σπουδή ενός αρχαίου μουσικού πολιτισμού χωρίς την εφαρμογή της εθνομουσικολογικής μεθόδου.

***Circiter tertia parte ponderis* (Vitruve 2, 5), L'EXISTENCE D'UNE CHAUX HYDRAULIQUE DANS L'ARCHITECTURE ROMAINE**

Introduction: l'emploi «industriel» de la chaux et des ajouts hydrauliques

La chaux, comme enduit et liant, est utilisée depuis la plus haute Antiquité.¹ Héritiers des techniques orientales, les Grecs et les Romains font de la chaux un usage important dans leur architecture. Toutefois, les Romains développent un emploi «industriel» de la chaux. Par rapport aux Grecs, ils sont sans doute les premiers à fabriquer un véritable liant hydraulique, c'est-à-dire capable non seulement de durcir à l'air, mais aussi sous l'eau, sans l'action du gaz carbonique. Cette manière de procéder allait révolutionner l'architecture romaine. Vitruve conseille dans le *De architectura* de mêler à la chaux (*calx*), de la pouzzolane de Campanie (*pulvis*) ou du sable volcanique (*harena fossicia*) ou encore le même sable volcanique, mais cuit au four cette fois (*carbunculus*). Lorsque la pouzzolane ou le sable volcanique font défaut, les Romains fabriquent des liants à base de chaux et de *testa* pilée (argile kaolinitique cuite broyée). Concernant le *carbunculus*, nous avons mis en évidence son existence de sable volcanique cuit au four, lors d'une précédente publication et qui a été confirmée depuis dans des échantillons de mortiers romains prélevés à Rome et à Ostie et qui furent analysés au moyen de la résonance magnétique nucléaire.² Le *carbunculus* est un exemple typique d'un matériau ou d'un produit dont Vitruve ne parle pas ou fait une allusion de quelques mots, surtout si ce matériau ou ce produit ne sont repris par aucun auteur latin postérieur. Vitruve a la réputation d'être un écrivain difficile à interpréter: Ph. Fleury, en rappelant le vieux débat de la critique vitruvienne allemande qui oppose les partisans du *Sachbuch* à ceux du *Fachbuch*, écrit que dans plusieurs de ses descriptions techniques,

¹ Cf. M.E. Blake, *Ancient Roman Construction in Italy from the Prehistoric Period to Augustus*, Wahsington, 1947; G. Lugli, *La tecnica edilizia romana, con particolare riguardo a Roma e Lazio*, tome 1, Rome, 1957, p. 363 sq.; R. Martin, *Manuel d'archéologie grecque*, tome 1, *Matériaux et techniques*, éditions Picard, Paris, 1965, p. 430 sq.; J.-P. Adam, *La construction romaine, matériaux et techniques*, éditions Picard, Paris, 1989, p. 69 sq.; R. Sersale, «La storia della calce dell'antichità ai nostri giorni», in *L'industria italiana del cemento*, 1, 1991, p. 56-62.

² Vitruve (2, 4, 2) rapporte que le sable volcanique (*harena fossicia*) doit être récemment extrait pour être utilisable. Cuire un sable volcanique est un procédé, qui pourrait pallier à cet inconvénient pour permettre une meilleure conservation. F. Davidovits, «A la recherche du *carbunculus*», in *Voces* (Université de Caen, Universidad de Salamanca, ISSN: 1130-3336), 5, 1994, p. 33-46. Dans le cadre du programme de recherche GEOCISTEM de l'Union Européenne, les analyses effectuées par la spectrométrie RMN sur des échantillons de mortiers de la région de Rome, datant du II^e siècle de notre ère, permettent de distinguer entre les roches pouzzolaniques calcinées (le *carbunculus*) et non calcinées. Cf. *Proceedings of the second international conference, Geopolymère '99*, Institut Géopolymère et INSSET (Université de Picardie), Saint-Quentin, 1999; paper 28: J. Davidovits, F. Davidovits, «Archaeological analogues and longterm stability of geopolymeric materials. Results from the european research project GEOCISTEM», p. 283-295.

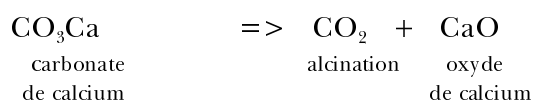
Vitruve paraît à la fois en dire trop et pas assez.³ Cela montre la difficulté qui attend le philologue dans l'analyse des textes techniques anciens.

La maîtrise de la chaux et des ajouts hydrauliques (pouzzolane, sable volcanique, tuileau) permet au béton de durcir au cœur de la voûte ou du mur sans le gaz carbonique de l'air. En effet, il faut savoir que l'air ne peut traverser une couche de chaux aérienne déjà carbonatée épaisse d'au moins 1,125 cm.⁴ Cela signifie que la chaux qui est au-delà de 1,125 cm ne peut pas durcir. Sans les ajouts hydrauliques que les Romains mélangent à la chaux aérienne, le béton ne peut pas prendre et donc les murs et les voûtes de béton («voûtes concrètes») ne peuvent être stables, comme le constate déjà Vitruve en 2, 4, 2.

Ces agrégats volcaniques ou de terre cuite sont à l'origine d'une révolution architecturale, dont un exemple célèbre est illustré par l'édification du Porticus Aemilia, ce gigantesque entrepôt traditionnellement daté entre -193 et -174, mais qui pourrait aussi être, d'après Steven L. Tuck, daté du temps de Sylla.⁵ La connaissance des agrégats «réactifs» à la chaux et la maîtrise de l'*opus caementicium* ont permis l'édification des voûtes concrètes dont la portée demeure encore des records.⁶ Le résultat de tout cela est la création d'un style architectural, que Vitruve appelle *consuetudo italica*: c'est la formation d'une architecture monumentale romaine, dont la caractéristique est basée sur la résistance et la plasticité du mortier.⁷

La cuisson de la chaux

Avant d'aborder le sujet de la chaux dans le texte de Vitruve, il convient de rappeler quelques notions élémentaires la concernant. La chaux est obtenue par cuisson de blocs de calcaire entre 750 °C et 950 °C, cuisson pendant laquelle le calcaire abandonne son gaz carbonique. Cuire le calcaire pour le transformer en chaux s'appelle «calcination». La calcination du calcaire est exprimée par l'équation chimique:



³ Vitruve, *De l'architecture*, livre 1, édit. Philippe Fleury, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1990: *Introduction* p. XXXV: «Aussi Vitruve nous semble-t-il, tout au long de son traité, s'adresser d'abord aux maîtres d'ouvrage (publics ou privés) à qui il propose une information succincte leur permettant non pas de devenir des architectes professionnels, mais d'être capables de juger et comprendre le travail des maîtres d'oeuvre, leur permettant même à l'occasion de diriger eux-mêmes les travaux des ouvriers pour leurs propres besoins. Cette perspective rend compte de certaines particularités du *De architectura*; en effet, dans plusieurs descriptions techniques, Vitruve paraît à la fois en dire trop et pas assez. Il en dit trop pour un lecteur profane qui n'est pas directement intéressé par les problèmes de construction, il n'en dit pas assez pour le professionnel qui voudrait construire à partir de l'écrit».

⁴ W. M. Patton, *A Treatise on Civil Engineering*, New-York, 1975, p. 175; D. Moore, *The Roman Pantheon, The Triumph of Roman Concrete*, Office Outlet, Pinedale, 1995, p. 49-69.

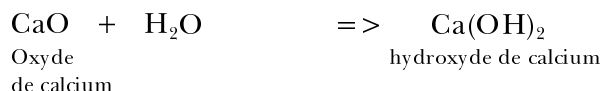
⁵ Steven L. Tuck, «A new identification for the 'Porticus Aemilia'», *Journal of Roman Archaeology*, n°13, fasc. 1, 2000, p. 175-182.

⁶ J.C. Anderson Jr., *Roman Architecture and Society*, Baltimore, 1997, p. 146-147.

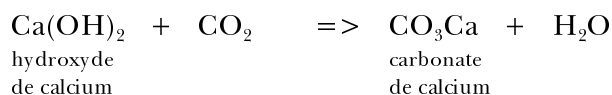
⁷ *Idem*, p. 147.

Le produit obtenu est appelé «chaux vive» (oxyde de calcium). On effectue alors l'«hydratation» ou «extinction» de la chaux. Cela se fait par immersion dans l'eau et provoque la dislocation des blocs de chaux. Ceux-ci foisonnent, dégagent une forte chaleur et se transforment en pâte qui est la «chaux éteinte». C'est ce matériau plastique que l'on va mêler aux agrégats pour obtenir les mortiers. Vitruve (2, 5, 1) appelle *calx extincta* ou *calx macerata* (7, 2, 1 / 7, 2, 2) la «chaux éteinte», mais notre architecte ne s'étend guère sur la calcination du calcaire.

L'opération chimique de l'extinction de la chaux s'exprime par l'équation suivante:



Puis l'hydroxyde de calcium durcit grâce au gaz carbonique de l'air et devient du carbonate de calcium, c'est-à-dire du calcaire. L'équation chimique s'exprime par:



Il faut signaler que la présence d'autres corps, comme l'argile (cuite ou crue) ou aussi la pouzzolane, bouleverse la prise de la chaux en se substituant complètement au gaz carbonique de l'air. Les argiles crues ne réagissent pas lorsqu'elles sont ajoutées à la chaux, et les argiles kaolinitiques calcinées à 800-900 °C influent sur le durcissement de la chaux. Les montmorillonites et les illites n'ont guère d'effet sur le phénomène de prise.

«L'extrême lenteur du phénomène de prise [de la chaux], qui est la caractéristique des calcaires purs, était fort prisée des constructeurs antiques, car elle permettait, grâce à la plasticité des mortiers, un tassement lent et progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation et une excellente répartition des pressions. Les chauxfourniers et les maçons avaient remarqué que les marbres répondaient parfaitement à ces caractéristiques, de même que les calcaires blancs».⁸ Tels sont les avantages, dépeints par J.-P. Adam, de l'utilisation systématique de la chaux aérienne par les Romains.

Les différentes sortes de chaux.

J.-P. Adam définit ainsi la classification traditionnelle des chaux.⁹ La présence d'argile ou de silice dans le calcaire modifie la chimie de la chaux aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant la proportion d'argile ou de silice, on peut définir deux sortes de chaux:

1) Les «chaux aériennes» se nomment ainsi, car la prise s'effectue seulement en présence du gaz carbonique (d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conservation

⁸ J.-P. Adam, *op. cit.* p. 76.

⁹ *Idem*, p. 76.

de grandes quantités de chaux éteintes). Les chaux aériennes se distinguent elles-mêmes en deux catégories:

a) la «chaux grasse», qui ou bien est de l'oxyde de calcium pur, ou bien contient 0,1 à 1% d'argile. A l'extinction, la chaux augmente de volume d'où cette appellation de «grasse», qui vient de *crassus* «épais». La chaux grasse ne durcit pas sous l'eau.

b) la «chaux maigre», qui contient 2 à 8% d'argile. Elle est dite «maigre» car son volume n'augmente pas dans les mêmes circonstances, et elle prend une moindre quantité d'eau. Même en faible proportion, l'argile a une influence non négligeable sur l'oxyde de calcium, puisque l'on peut supposer que le calcaire a une proportion d'argile d'origine de 10 à 12%.

2) Les «chaux hydrauliques» peuvent prendre sous l'eau. Ainsi, un mortier de chaux hydraulique peut être submergé après mise en forme, sans que son durcissement soit interrompu. Elles sont obtenues avec des calcaires contenant entre 8 et 20% d'argile. Il faut noter que les chaux hydrauliques naturelles sont calcinées comme les chaux aériennes aux mêmes conditions. Ajoutons qu'on peut aussi mélanger à la chaux normale de l'argile cuite kaolitique, de la *testa*, comme le conseille Vitruve (2, 5, 3). On obtient alors un liant hydraulique, qui est la principale innovation des Romains concernant le domaine architectural. Toutes ces chaux hydrauliques naturelles ou «artificielles», après calcination et extinction, durcissent seules sans l'intervention du gaz carbonique.

En théorie, telles sont les différentes chaux qu'employèrent les Romains. Or, dans la pratique, on n'est pas sûr de l'emploi de chaux hydraulique par les ingénieurs romains, et, J.-P. Adam écrit que les «analyses contemporaines font apparaître que les constructeurs romains n'ont utilisé que des chaux aériennes».¹⁰ M. Frizot remarque que, dans les mortiers antiques, la chaux s'est entièrement carbonatée, alors que dans les liants médiévaux, elle n'a pas encore durci.¹¹ Cela revient à dire qu'il lui faut plusieurs siècles pour durcir! Il paraît inutile de construire un bâtiment avec la chaux aérienne s'il faut attendre tout ce temps pour qu'elle fasse prise. C'est évidemment absurde, si l'on veut expliquer la solidité des monuments romains par la seule carbonatation de la chaux. Pour M. Frizot, le durcissement pourrait s'expliquer par des silicates solubles, issus des agrégats volcaniques et du «tuileau» dont l'action sur la prise du mortier est complète avant la très lente carbonatation de la chaux. M. Frizot remarque que la chaux hydraulique a pu être employée localement pour des bâtiments, mais qu'il est difficile d'attester un emploi systématique de cette chaux à l'époque romaine.

Donc, jusqu'à maintenant, lorsque les auteurs précédemment cités lisaient l'œuvre de Vitruve, ils ne voyaient nulle part la mention explicite d'une chaux hydraulique et en concluaient que Vitruve, dans le cinquième chapitre du livre II décrivait seulement une chaux aérienne. En fait, il faut examiner attentivement le texte vitruvien pour déterminer quel type de pierre ou de chaux, il recommande pour les murs et pour les enduits.

¹⁰ *Idem* p. 75.

¹¹ M. Frizot, *Mortiers et enduits peints antiques. Etude technique et archéologique*, Dijon, 1975, p. 310-318.

Le chapitre 5 du livre II ou la théorie chimique de Vitruve

Dans ce chapitre, Vitruve parle de la composition du calcaire et du choix du calcaire soit pour le gros œuvre, soit pour les enduits, puis il y explique les réactions chimiques de la chaux lors de la cuisson, de l'extinction et de la prise.

Résumé du chapitre 5

2, 5, 1: On choisit pour la cuisson de la chaux, un type de pierre blanche ou une roche solide ou bien, une pierre ou une roche solide, lesquelles seront blanches [*uti de albo saxo aut silice coquatur*]. Pour chaque type de construction correspond une chaux issue d'un type de pierre précise: ainsi la chaux qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure [*ex spisso et duriore*] conviendra pour la maçonnerie [*in structura*], celle qui sera faite avec une pierre poreuse [*ex fistuloso*], pour les enduits [*in tectoriis*].

2, 5, 2: La chaux assure la solidité d'une construction quand de l'eau et du sable s'y trouvent mêlés, car les pierres à chaux [*saxa*], comme tous les autres corps, sont composées des quatre éléments [*e principiis*]: *aqua* «eau», *terra* «terre», *aer* «air», *ignis* «feu». Vitruve décrit alors les qualités des calcaires qui ont un élément plus dominant que les autres. Ces qualités de calcaires rappellent les caractéristiques du travertin (2, 7, 1). Mais ce n'est pas parce qu'un calcaire contient l'élément «feu», qu'il est une chaux. En effet, si on pile finement ces pierres calcaires [*saxa*] sans être cuites [*antequam coquantur*], et qu'on les mélange à du sable volcanique [*contusa minute mixta harenae*], elles ne durcissent pas. Il faut donc cuire les pierres calcaires si on veut vraiment obtenir de la chaux. Au niveau microscopique, les calcaires, quand ils sont cuits, perdent des éléments constitutifs, (*aqua* «air» et *ignis* «eau»), et à leur place, apparaissent des pores ou des trous [*foraminibus*] ouverts et vides.

2, 5, 3: Dans les calcaires calcinés, il reste de la chaleur dans la chaux vive, qui partira au contact de l'eau. La calcination fait perdre du poids au calcaire: la pesée des blocs de chaux montre qu'ils ont perdu presque un tiers de leur poids [*circiter tertia parte ponderis*]. Au niveau microscopique, la chaux adhère à l'agrégat.

La théorie des quatre éléments de Vitruve

Le deuxième chapitre du livre II constitue le texte organisateur de la théorie physico-chimique de ce livre. A partir de ses lectures, Vitruve compose une théorie des quatre éléments, qui est un mélange des systèmes de Démocrite, des néo-pythagoriciens, et des idées d'Empédocle et de Platon.¹² C'est à partir de cette théorie hétérogène des quatre éléments qu'il analyse les matériaux, leurs caractéristiques essentielles et leurs interactions chimiques quand ils sont mélangés. Au moyen de sa théorie, Vitruve veut établir les fondements scientifiques de l'architecture.

Le cinquième chapitre du livre II est donc l'occasion pour Vitruve d'appliquer cette théorie et de prouver que l'architecture est une science: le choix des matériaux et leurs propriétés, donc leurs usages, sont le résultat d'une connaissance scientifique et

¹² Cf. Vitruve, *De l'architecture, livre 2*, édit. Louis Callebaut, Pierre Gros et Catherine Jacquemard, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1999: *Introduction* p. XXXIV-XXXV; F. Pellati, «La dottrina degli elementi nella fisica di Vitruvio», *Rinascimento*, 2, 1951, p. 241-259.

d'une capacité à mener des expériences et des observations. Pour cela, la maîtrise du feu, qui a permis l'essor de la civilisation humaine (Vitr. 2, 1, 1-2), apporte à notre théoricien une aide précieuse pour valider sa théorie. Le choix de la chaux est pertinent pour la théorie vitruvienne. En effet, Théophraste (*lapid.* 9) rapporte que le calcaire ou le marbre, quand ils sont cuits dans un four, ne laissent pas de scories, contrairement aux minerais métalliques.¹³ Le test du feu est donc un moyen pour déterminer la qualité des pierres et des minerais. Le four à chaux décompose, au moyen du feu, le calcaire en ses éléments constitutifs: il est donc un instrument pratique pour la connaissance du matériau et de son usage en architecture.

Analyse de la calcination de la chaux d'après la théorie des quatre éléments de Vitruve (2, 5, 2-3)

Dans le four (*in fornacem*), la violence du feu (*ignis vehementia*) détruit la cohérence (*soliditas*) de la pierre calcaire (*lapis*). Au niveau microscopique, les éléments *liquor* «eau» et *aer* «air» disparaissent et un «vide», comme le définit Lucrèce (1, 330), se crée dans la pierre, sous la forme de trous ou de pores (*foramina*). A cœur du calcaire, devenu de la chaux vive, il y a stockage d'une chaleur (*calor*) créée par le feu du four ou par l'élément «feu» propre au calcaire. Cette chaleur se cache (*latens*) dans les trous. Vitruve en 2, 5, 2-3 décrit le phénomène de chaleur dans l'extinction de la chaux. La cuisson au four a chassé les éléments «liquide» *liquor* et «air» *aer* de la pierre, mais il reste de la chaleur cachée *in se residuum calorem latentem*; c'est ce qui permet à la chaux d'être «allumée» par l'eau au moment de l'extinction ou de l'hydratation de la chaux. Selon Vitruve, l'eau prend alors la place des éléments, qui avaient été chassés par la cuisson.

Définition chimique de la chaux

D'après la description de Vitruve, on peut définir la chaux vive de la manière suivante: la chaux vive est un corps plein de trous (*foramina*), incomplet, car n'ayant plus que de la «terre» et du «feu» et de la «chaleur cachée» (*calor latens*). A la sortie du four, la chaux est un corps incomplet, privé d'éléments constitutifs («eau» et «air»), et une substance instable, qui veut retrouver son équilibre «élémentaire».

Pour expliquer les phénomènes d'extinction et de prise de la chaux, Vitruve utilise le mot *ieiunitas* signifiant «grande faim» au sens propre. Sous un sens figuré, il signifie «sécheresse, absence d'humidité» chez Vitruve. La chaux vive, substance incomplète et déséquilibrée, «ressent» un manque, une «faim» qui la pousse à absorber et adhérer aux autres corps au moment de la prise du mortier. La chaux récupère alors les éléments des autres corps pour retrouver son équilibre. En 7, 3, 7, Vitruve explique qu'en durcissant, c'est-à-dire en retrouvant son équilibre «élémentaire», la chaux se reconstitue au point qu'elle semble revenir à son état antérieur de calcaire [*cum fit arida, redigitur uti sui generis proprias uideatur habere qualitates*]. Au niveau microscopique, la *ieiunitas* a pour catalyseur la chaleur cachée (*calor latens*), qui s'échappe de la chaux, quand celle-ci est éteinte. La notion de *ieiunitas* est l'explication des réactions chimiques de la chaux.

¹³ Theophr. *lapid.* 9: Κατὰ δὴ τὴν πύρῳσιν οἱ μὲν τήκονται καὶ ῥέουσιν ὥσπερ οἱ μεταλλευτοί. ῥεῖ γὰρ ἅμα τῷ ἀργύρῳ καὶ τῷ χαλκῷ καὶ σιδήρῳ καὶ ἡ λίθος ἢ ἐκ τούτων, εἴτ' οὖν διὰ τὴν ὑγρότητα τῶν ἐνυπαρχόντων εἴτε καὶ δι' αὐτούς· ὡσαύτως δὲ καὶ οἱ πυρομάχοι καὶ οἱ μυλῖαι συρρέουσιν οἷς ἐπιτιθέασιν οἱ καίοντες. οἱ δὲ καὶ ὅλως λέγουσι πάντας τήκεσθαι πλὴν τοῦ μαρμάρου, τοῦτον δὲ κατακαίεσθαι καὶ κονίαν ἐξ αὐτοῦ γίνεσθαι.

Le four à chaux comme explication théorique

Avec la métaphore du four à chaux, Vitruve a trouvé une explication théorique qui lui permet d'expliquer des phénomènes naturels. Nous signalerons deux exemples.

Dans le sixième chapitre du livre II, Vitruve décrit les caractéristiques de la pouzzolane de Baïa et donne un aperçu général du volcanisme (sources chaudes notamment) et des matières issues de ce volcanisme. Concernant les terres et les tufs volcaniques, qui ont subi une chaleur intense, Vitruve (2, 6, 3) écrit: «tout porte à croire que la violence du feu [*ignis uehementia*] a ôté son humidité [*liquorem*] au tuf et à la terre [*ex tofo terraque*], comme elle le fait à la chaux dans les fours [*quemadmodum in fornacibus ex calce*]». ¹⁴ Le système volcanique se comporte comme un immense four à chaux: on y trouve la «violence du feu», qui enlève aux corps leur «élément liquide» (*liquor*). En 2, 9, 14, le *larix*, une espèce de mélèze ne s'enflamme pas au contact du feu et ne peut pas s'embraser de lui-même. Il brûle la flamme d'autres bois, comme brûlent les pierres qu'on cuit dans un four à chaux [*uti saxum in fornace ad calcem coquendam*]. ¹⁵

Avec la connaissance du feu et du four, Vitruve a donc un modèle théorique qui lui permet d'expliquer les phénomènes naturels et artificiels. Les manifestations physiques dans le four à chaux correspondent à celles qu'on observe dans la nature, car les forces physiques sont identiques.

La recherche et l'observation du phénomène: Vitruve, héritier de la science grecque

Avant d'analyser l'expérience de Vitruve, il serait judicieux de voir comment les savants grecs faisaient le lien entre la théorie et l'observation. Celle-ci n'est pas effectuée pour elle-même, mais pour l'aide qu'elle peut apporter aux problèmes théoriques. Dans son livre «l'Optique», Ptolémée expose certains cas de recherches empiriques détaillées, conduites à l'aide d'appareils conçus spécialement à cet effet. Ainsi G.E.R. Lloyd écrit: «Ptolémée mesure la réfraction qu'il a constatée entre ses trois couples de milieux et il propose ses résultats pour des angles d'incidence 10° à 80°. Dans les trois cas, les premiers résultats sont précédés de l'adverbe 'presque' et tous sont énoncés en degrés et demi-degrés. Il semble donc tenir compte des approximations. Le plus surprenant, pourtant, c'est que tous les résultats s'accordent exactement avec une loi générale qui s'exprime sous la forme de l'équation $r = ai - bi^2$, où r est l'angle de réfraction, i l'angle d'incidence, a et b des constantes pour les milieux concernés». ¹⁶

Pour G.E.R. Lloyd, si l'importance de la relation théorie/expérience est variable

¹⁴ Vitr. 2, 6, 3: *Si ergo in his locis aquarum feruentes inueniuntur fontes et in omnibus excauatis calidi uapores ipsaque loca ab antiquis memorantur peruagantes in agris habuisse ardores, uidetur esse certum ab ignis uehementia ex tofo terraque, quemadmodum in fornacibus ex calce, ita ex his ereptum esse liquorem.*

¹⁵ Vitr. 2, 9, 14: *Larix uero, qui non est notus nisi is municipalibus qui sunt circa ripam fluminis Padi et litora maris Hadriani, non solum ab suci uehementi amaritate ab carie aut tineae non nocetur, sed etiam flammam ex igni non recipit, nec ipse per se potest ardere, nisi uti saxum in fornace ad calcem coquendam aliis lignis uratur.*

¹⁶ G.E.R. Lloyd, «Observation et recherche», in Jacques Brunschwig, Geoffrey Lloyd et al., *Le savoir grec, dictionnaire critique*, Flammarion, Paris, 1996, p. 250-275; p. 269.

selon les savants grecs, il y a un point commun aux procédures expérimentales grecques: elles constituent des témoignages pour corroborer une théorie ou une série de résultats particuliers. «A cet égard, l'expérimentation ne sert pas tant de procédure de vérification neutre –idéale– que de témoignage pour confirmer un point de vue précis».¹⁷ De fait, l'observation sert souvent à confirmer ou à réfuter une thèse particulière, mais une fois le but atteint, le savant estime qu'il n'est pas nécessaire d'aller plus loin dans la recherche. Souvent aussi, les observations scientifiques, y compris celles qui sont effectuées dans un cadre expérimental, servent à étayer une thèse préétablie.¹⁸

L'expérience de Vitruve

Héritier des savants grecs, Vitruve connaît les méthodes expérimentales, en usage dans la science grecque depuis la fin de l'époque classique.¹⁹ Le cadre théorique de ses idées sur les quatre éléments semble donc bien défini. Dans la nature, tous les corps sont composés de ces quatre éléments constitutifs: l'air, la terre, l'eau, le feu. Le théoricien postule que tout corps, subissant une chaleur intense ou la «violence du feu» perd des éléments constitutifs. Si les phénomènes physiques sont les mêmes dans la nature et dans le four à chaux, ces phénomènes sont donc reproductibles et mesurables.

Pour prouver son hypothèse que le calcaire perd du poids à la calcination et donc que la théorie des quatre éléments explique cette observation, Vitruve doit donc quantifier ce qu'on appelle la «perte au feu» qui est l'évaporation du dioxyde de carbone (CO₂) du calcaire à la cuisson. Cette perte au feu se caractérise par une perte du poids du calcaire lors de la cuisson. Cela semble être un fait connu pour les chauffourniers antiques et modernes, mais à notre connaissance, c'est la seule fois qu'un auteur latin mesure ainsi ce phénomène: nulle trace d'une telle expérience chez Caton et les auteurs latins postérieurs à Vitruve.

Pour mener à bien son expérience, Vitruve a besoin des éléments suivants:

- des blocs de calcaire, extraits d'une carrière;
- un four à chaux (*fornax calcaria*), comme celui décrit par Caton (*agr.* 38, 1-4);²⁰
- une balance à contrepoids appelée en français «balance romaine» *trituna* (Vitr. 10, 1, 6) ou *statera*, dont Vitruve donne une description en 10, 3, 4 (Cf. Pseudo-Aristote *Mech.* 20 et Héron *Mech.* 1, 32-33) ou une balance à deux plateaux *libra*:²¹ Vitruve ne précise pas lesquelles il a employées.

Vitruve a donc pesé les blocs de calcaire avant la cuisson et après. L'expérience est simplifiée par le côté pratique de la cuisson de la chaux, puisque celle-ci ne laisse pas de

¹⁷ *Ibid.*

¹⁸ *Op. cit.*, p. 273-274.

¹⁹ Sur les procédures de validation et leur mise en oeuvre dans d'autres secteurs techniques: G.E.R. Lloyd, «Observation et recherche», p. 250-275 et «La démonstration et l'idée de science», p. 276 sq. et p. 294 sq. *op. cit.*

²⁰ Pour les descriptions des fours: J.P. Adam, *op. cit.*, p. 71-72; David Moore, *op. cit.*, p. 49-69.

²¹ Pourtant *trituna* désigne une balance à deux plateaux (Juv. 6, 437) comme *statera* (Petron. 35; Suet. *Vesp.* 25; Stat. *sylv.* 4, 9, 46); Sur les balances cf. A. Rich, *Dictionnaire des antiquités romaines et grecques*, Didot, Paris, 1859, s. u. *libra*, *statera*, *trituna*; E. Michon, s. u. *libra*, in C. Daremberg, E. Saglio, E. Pottier, *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines*, III, 2, 1877-1919, Paris, p. 1222 sq.; E. Michon, s. u. *trituna*, in C. Daremberg, E. Saglio, E. Pottier, *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines*, V, 1877-1919, Paris, p. 520 sq.

scories dans le four. De plus, le calcaire change peu de volume après la cuisson. Laissons-le exposer le résultat de son expérience: «En conséquence, le poids des pierres à chaux que l'on sort du four ne peut pas être égal à celui qu'elles ont au moment où on les y jette: quand on les pèse, et bien qu'elles conservent le même volume, on constate - l'eau ayant disparu sous l'effet de la chaleur - que leur poids est diminué d'environ un tiers [*circiter tertia parte ponderis inminuta esse inueniuntur*]».²² On sait qu'il existe une différence de poids entre la pierre calcaire et la chaux.²³ Cette différence de poids d'un tiers est fondamentale dans la suite de notre étude.

Circiter chez Vitruve

Analysons le compte-rendu de son expérience. On pourrait croire que l'emploi de *circiter*, utilisé comme adverbe signifiant «à peu près, environ» avec des nombres ou des valeurs numériques, suppose une valeur approximative ou imprécise. Or il n'en est rien: chez Vitruve, on trouve quelques exemples où *circiter* est accompagné de nombres entiers ou d'entiers et d'un reste, sous la forme d'une fraction comme 1/2, 1/3, etc.²⁴

En 9, 1, 10, Vitruve indique le temps de révolution de Mars, Jupiter et Saturne sur la voûte céleste et pour quantifier ce temps, il utilise *circiter*. Dans les trois cas, l'architecte donne des temps qui sont aussi précis que ceux de Ptolémée et cette précision fait l'admiration du traducteur J. Soubiran.²⁵

En 10, 14, 1, Vitruve présente parmi les machines de siège, les tortues de terrassiers (*testudo, quae ad congestionem fossarum paratur*). D'après le texte, les quatre pièces

²² Vit. 2, 5, 3: *Ideo autem, quo pondere saxa coiciuntur in fornacem, cum eximuntur, non possunt ad id respondere, sed cum expenduntur, permanente ea magnitudine, excocto liquore, circiter tertia parte ponderis inminuta esse inueniuntur.*

²³ Cf. J.-P. Adam, *op. cit.* p. 75; David Moore, *The Roman Pantheon, The Triumph of Roman Concrete*, University of Guam Station, Mangilao, Guam, 1995, p. 49-69.

²⁴ L. Callebat, P. Bouet, Ph. Fleury, M. Zuinghedeau, *Vitruve, De Architectura, Concordance*, Olms-Weidmann, Hildesheim-Zürich-New York, 1984, p. 174; «*Circiter*» est répété 25 fois chez Vitruve. Comme adverbe: 1, 6, 6; 2, 5, 2; 2, 8, 18; 2, 9, 7; 5, 12, 6; 7, pr, 15; 7, 1, 6; 7, 4, 1; 7, 4, 5; 8, 3, 11; 8, 5, 1; 9, 1, 5; 9, 1, 8; 9, 1, 10; 9, 1, 10; 9, 1, 10; 9, 2, 4; 10, 2, 8; 10, 2, 12; 10, 2, 14; 10, 8, 1; 10, 8, 2; 10, 14, 1; 10, 15, 6; 10, 15, 7. Comme préposition: 8, 1, 4; 9, 2, 2; 9, 2, 4.

²⁵ Vitruve, *De l'architecture*, livre 9, édit. Jean Soubiran, Collection des Universités de France, éditions Les Belles-Lettres, Paris, 1969; Vit. 9, 1, 10: *Martis uero circiter sexcentesimo octogesimo tertio siderum spatia peruagando [...]* «Mars, lui, doit parcourir l'étendue des constellations en 682 jours environ». La révolution est en fait de 687 jours et le commentaire de J. Soubiran écrit (p. 96-97): «Le chiffre donné par Vitruve est donc exceptionnellement précis. Seul Ptolémée, avec 1 an 321 j 23 h, fera mieux que lui»; Pour Jupiter: *Iouis autem, placidioribus gradibus scandens contra mundi uersionem, circiter ccclx diebus singula [in] singula signa permittitur, [...]* «Quant à Jupiter, dont la marche ascendante contre la révolution du ciel se fait à pas plus tranquilles, il met environ 360 jours pour parcourir chaque signe». J. Soubiran explique (p. 97): «Seul avec Ptolémée, qui, avec ses 11 ans 314 j 7 h, s'approche très près de la valeur admise aujourd'hui (11 j, 314,84 j), Vitruve ne se contente pas de 12 ans»; Pour Saturne: *Saturni uero, mensibus undetriginta et amplius paucis diebus peruadens per signi spatium, anno nono et uicensimo et circiter diebus clx in quo ante tricensimo fuerat anno in id restituitur* «Saturne, lui, franchit l'étendue d'un signe en 29 mois et quelques jours, et au bout de 29 ans et 160 jours environ, il retrouve l'emplacement qu'il occupait trente années auparavant». J. Soubiran conclut (p. 98): «Mais, Vitruve, avec 29 ans 160 j, se rapproche plus près la valeur moderne (29 ans 167 j) que Ptolémée lui-même (29 ans 182 j). La comparaison, est licite, car la différence entre la révolution apparente dans le ciel et la révolution réelle autour du soleil est négligeable, vu la distance qui sépare la terre de Saturne. On se demandera seulement, une fois encore, d'où Vitruve a tiré les éléments de sa notice».

transversales (*transuersaria*) de la plate-forme de la tortue (*testudo*) sont espacées de presque trois pieds et demi (*circiter pedes III s*).²⁶ En fait, Ph. Fleury note que pour obtenir la largeur totale de la plate-forme de cette tortue, «l'écartement des *transuersaria* doit être en effet très légèrement supérieur à trois pieds et demi».²⁷ Chez Vitruve, ces quelques exemples montrent que la locution «*circiter* + nombre» indique: soit une grandeur précise quantifiable avec un nombre entier, soit une grandeur presque précise qu'on quantifiera avec une fraction. On peut ainsi traduire: *circiter tertia parte ponderis inminuta esse inueniuntur* «leur poids est diminué de presque un tiers».

Conclusion de Vitruve sur l'expérience

Vitruve constate qu'effectivement le poids des pierres avant et après la cuisson ne correspond pas. Cette différence de poids est remarquable: les pierres, tout en gardant le même volume (*permanente ea magnitudine*), ont perdu presque un tiers de leur poids (*circiter tertia parte ponderis*). Sa théorie des quatre éléments est donc validée par son observation: il peut donc expliquer la nature «élémentaire» de la chaux et expliquer sa prise (2, 5, 1-3; 7, 3, 7). La chaux, substance incomplète et déséquilibrée par la cuisson, ressent un «manque, une «faim» (*ieiunitas*) qui la pousse à adhérer aux autres corps au moment de sa prise. La chaux s'empare alors des éléments constitutifs des autres corps pour retrouver son équilibre «élémentaire». La *ieiunitas* (soif, sécheresse) de la chaux explique sa prise (7, 3, 7) et cette «sécheresse» est une propriété de la chaux, qui est exploitée par le maçon pour enduire un mur (7, 4, 3).

Cette notion de *ieiunitas* ne s'applique pas à la chaux seule, mais à d'autres corps naturels, qui ont subi une cuisson intense, comme les tufs volcaniques (2, 6, 4). Avec sa théorie des matières qui ont perdu des éléments constitutifs lors d'une cuisson, Vitruve dispose d'un modèle (le four à chaux) qui lui permet d'expliquer des phénomènes comme le volcanisme et les caractéristiques du *larix*. Les phénomènes observés dans un four sont de même nature que ceux qu'on trouve dans la nature, car les forces physiques sont les mêmes.

La chaux hydraulique de Vitruve

Cette longue étude était nécessaire pour comprendre l'importance de la chaux pour Vitruve. A partir d'une expérience, Vitruve quantifie la perte au feu du calcaire cuit et en tire une loi: le calcaire perd deux éléments, l'«eau» (*liquor*) et l'«air» (*aer*) quand il est cuit. Il a pu quantifier cette perte de dioxyde de carbone assez précisément avec les

²⁶ Vitruve, *De l'architecture*, livre 10, édit. Louis Callebaut et Philippe Fleury, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1986; Vitr.10, 14, 1: *Basis compingatur, quae graece ἐσχάρᾱ dicitur, quadrata habens quoqueuersus latera singula pedum XXI et transuersaria IIII. Haec autem contineantur ab alteris duobus crassis I s, latiss; distent autem transuersaria inter se circiter pedes III s*. «On assemblera une plate-forme, dite en grec «eschara», carrée par tous ses côtés, dont chacun sera de vingt et un pieds, et munie de quatre pièces transversales. Ces pièces doivent être maintenues par deux autres pièces, épaisses d'un pied et demi, larges d'un demi pied; l'espacement entre les pièces transversales sera d'environ trois pieds et demi».

²⁷ *Op. cit.*, note 3 p. 254.

moyens disponibles à son époque. Ce résultat expérimental, qui est important pour Vitruve, l'est aussi pour nous, car cette indication va nous permettre de déterminer quel type de calcaire Vitruve calcine et quelle nature de chaux on obtient ainsi.

Avec nos connaissances modernes, nous pouvons réinterpréter la mesure d'un tiers obtenue par l'expérience vitruvienne. On connaît le poids du dioxyde de carbone dans la molécule de calcite. Dans le cas idéal où la pierre contient 100% de calcite (CaCO_3), la cuisson fait perdre 44% de dioxyde de carbone (CO_2) à la pierre. Celle-ci perd donc 44% de son poids et l'on obtient une chaux très grasse, la meilleure des chaux aériennes. Les calcaires, qui sont composés à 95% de calcite et 5% de silice, ont une perte au feu de 43% et donnent donc une chaux moyennement grasse. Cette perte diminue jusqu'à 40%, si le calcaire contient 10% de silice; la chaux est alors maigre et faiblement hydraulique.

A partir de ces calculs, nous prenons donc la mesure de Vitruve: celui-ci écrit que la différence de poids est de presque un tiers *circiter tertia parte ponderis* après la cuisson. La perte au feu est donc de 33%, ce qui donne un calcaire, qui contient avant cuisson 75% de CaCO_3 et 25% de matériau siliceux. La chaux obtenue est alors maigre et moyennement hydraulique, d'après les définitions des chaux dont nous avons parlé *supra*.

Quel calcaire choisit Vitruve? Exemples de la péninsule italienne

En 2, 5, 1, il écrit: «Une fois traitée la question des différents sables que l'on trouve, on s'intéressera plus particulièrement aussi à la chaux: celle-ci doit être obtenue par calcination de pierre blanche ou de roche solide; celle qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure conviendra pour la maçonnerie, celle qui sera faite avec une pierre poreuse, pour les enduits».²⁸

Vitruve prend des calcaires durs et/ou blancs *uti de albo saxo aut silice coquatur*. Ce calcaire dur, qui a une perte au feu de 33%, correspond à une pierre contenant 75% de CaCO_3 et 25% d'autres éléments. Le calcaire dur et siliceux peut correspondre, par exemple, à la description d'un calcaire compact blanc à grain très fin et à fracture conchoïdale qu'on trouve à Varese (Italie du Nord) et qu'on exploite pour en faire des pavés. C'est un calcaire de type «roche sédimentaire organogène». Il existe bien sûr d'autres couleurs (jaunâtres, roses, rouges, grises et noires) dues à la présence d'ocres limonitiques ou hématiques et d'éléments charbonneux ou de bitumineux. Le grain est fin, voire très fin et la texture est compacte. La stratigraphie est d'habitude peu nette, ce qui a pour conséquence une fracture conchoïdale: la cassure est de même nature que celle qu'on obtient sur un verre ou un silex.²⁹ Ce calcaire compact et siliceux a l'aspect d'un silex et il contiendrait autour de 20% de silice.

La géologie de Segni

Bien entendu, du fait de son éloignement géographique, le calcaire compact de Varese a peu de chance d'être celui qu'on utilisait à Rome à l'époque tardo-républicaine.

²⁸ Vit. 2, 5, 1: *De harenae copiiis cum habeatur explicatum, tum etiam de calce diligentia est adhibenda uti de albo saxo aut silice coquatur; et quae erit ex spisso et duriore erit utilis in structura, quae autem ex fistuloso, in tectoriis.*

²⁹ A. Mottana, R. Crespi, G. Liborio, *Minerali e rocce*, dixième édition, Arnoldo Mondadori Editore, Milan, 1993, p. 339.

Il est plus probable qu'on calcinât des calcaires romains ou des environs. Mais nous connaissons un exemple frappant dans le Latium, par son apport à l'histoire de l'architecture romaine et par sa géologie: il s'agit de Segni.³⁰ Cette colonie latine, située non loin de la *via latina* au sud-est de Rome, après les monts Albins, domine la vallée du Sacco dans chaîne montagneuse des Lepini. L'ancienne Signia culmine à 668 mètres d'altitude et est une acropole, connue pour ses murs polygonaux, son temple à podium et son bassin ou citerne. Elle a donné son nom au *signinum*, ce mortier imperméable de terre cuite broyée («coccio pesto» ou en latin *testa*).³¹ Nous nous intéresserons au bassin qui se trouve près de l'église San Pietro,³² qui a servi à recueillir l'eau de pluie. Ce bassin évoque «les citernes de Signia» (*opera signina*) dont Vitruve (8, 6, 14) décrit la construction. Ce bassin de collecte d'eau de pluie est creusé dans la roche calcaire et est constitué d'un parement de tuf volcanique ou calcaire et d'un béton de 60 cm de large.³³ Se trouvant dans la cité qui a donné son nom à la célèbre technique constructive, on s'attendrait à ce que ce béton soit constitué de tesson de céramique ou de sable volcanique, or ce n'est pas le cas: d'après l'analyse de C.F. Giuliani, il contient du sable (calcaire?) et des petits fragments de calcaire. Les agrégats sont assez homogènes (entre 1 à 3 livres). Si l'on compare le banc rocheux calcaire et les composants du béton, le résultat est probant: le banc rocheux environnant a pu fournir les matériaux soit la chaux soit pour les agrégats.³⁴

Lors d'une visite à Segni, en 1991, nous avons pu voir ce bassin et le podium de l'église San Pietro, laquelle est constituée de calcaire compact et de tuf volcanique gris/noir (appelé «tuffo» dans la région). La géologie de la région de Segni est ainsi instructive: les collines sont faites de strates alternées de calcaire compact et d'argile kaolinitique rouge (argile de type dickite, avec 10% d'oxyde de fer). D'ailleurs dans la ville voisine de Colferro, une cimenterie d'Italcementi exploitait ce calcaire pour en faire soit de la chaux hydraulique soit du ciment Portland. Cette dernière indication nous permet de penser que la chaux du bassin pourrait être une chaux hydraulique, car la géologie de Segni peut la fournir aisément.

D'une manière générale, après l'extinction d'une chaux hydraulique, il se forme du

³⁰ G. Maria de Rossi, *Segni*, I, Università degli studi di Salerno, Quaderni del dipartimento di scienze dell' antichità, Arte Tipografica, Napoli, 1992.

³¹ L'argile utilisée dans le *signinum* est une argile kaolinitique qui est l'équivalent d'une pouzzolane: Sur la chimie de l'*opus signinum* et les éléments qu'apportent l'argile kaolinitique: J. Davidovits et F. Davidovits, «Archaeological analogues and long-term stability of geopolymeric materials, Results from the European Research Project GEOCISTEM», in *Geopolymère '99 international conference*, édit. J. et R. Davidovits, Institut Géopolymère et INSSET (Université de Picardie-Jules Verne), Saint Quentin, 1999, p. 283-295; F. Davidovits et J. Davidovits, «Long-lasting Roman cements and concretes», *op. cit.* p. 315-320; Premier emploi connu dans des citernes de Jérusalem sous Salomon, Xe siècle av. J.-C.: V. Furlan et P. Bissegger, «Les mortiers anciens, histoire et essai d'analyse scientifique», *Revue suisse d'art et d'archéologie (Zeitschrift für schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte)*, 32, 1975, p. 166-178.

³² *Op. cit.* p.67-86.

³³ C.F. Giuliani, «*Opus signinum* e coccio pesto» in *Segni*, I (*op. cit.*, n. 30), p. 89-94.

³⁴ Le fond du bassin est quand même recouvert d'un vrai couche d'*opus signinum*; C.F. Giuliani, *op. cit.* p. 93: «Nel conglomerato mancano sia la pozzolana sia i frammenti di laterizio, sono invece presenti sabbia e frammenti minuti di calcare; il pietrame è di dimensioni abbastanza contenute ed omogenee (il peso oscilla tra 1 e 3 libbre). Il risultato è di assoluta omogeneità quanto alla resistenza ed al colore con il banco roccioso circostante dal quale provennero verisimilmente i materiali sia per la calce sia per il pietrame».

silicate de calcium qui est aussi un composant majeur du «ciment Portland». D'après notre petit calcul, la chaux qu'obtient Vitruve est, d'après nos critères modernes, une chaux hydraulique. La présence de la chaux hydraulique dans les mortiers a été discutée par de nombreux auteurs, dont J.-P. Adam.³⁵ M. Frizot explique ainsi son point de vue: «Nous pensons en effet que si des chaux hydrauliques ont été employées dans l'Antiquité (et cela est rarement prouvé), c'est plutôt par méprise ou hasard que par connaissance réelle des possibilités».³⁶

Cette indication de Vitruve, sur la perte d'un tiers de poids du calcaire calciné est étonnante. Elle contredit ce que l'on pensait jusqu'à présent, à savoir que les Romains n'ont employé que de la chaux aérienne. On ne peut pas supposer l'altération du texte latin, car l'apparat critique n'en révèle aucune. F. Krohn, qui a établi la version du texte latin de Vitruve en 1912 chez Teubner à Leipzig, a transféré cette phrase de 2, 5, 3 à la fin du paragraphe précédent (2, 5, 2), car Vitruve fait un retour à la phase de la calcination, après l'évocation de la phase d'hydratation. Mais P. Gros n'est pas d'accord avec ce déplacement et écrit: «C'est oublier, au nom d'une logique technique ou opératoire, la logique propre au théoricien qui entend préparer la formule conclusive du chapitre, laquelle prétend expliquer la cohésion de la maçonnerie concrète».³⁷

Il paraît donc étonnant que personne n'ait vérifié la proportion fournie par Vitruve, pour déterminer quel type de pierre calcaire il calcinaît et en conséquence quelle chaux il obtenait. Peut-être a-t-on supposé que cela n'en valait pas la peine: puisque l'on postulait par principe que Vitruve parlait de pierre blanche, alors seule une pierre blanche donnait *ipso facto* de la chaux aérienne.

Où placer cette chaux hydraulique issue de l'expérience vitruvienne?

Examinons le texte en 2, 5, 1: «Une fois traitée la question des différents sables que l'on trouve, on s'intéressera plus particulièrement aussi à la chaux: celle-ci doit être obtenue par calcination de pierre blanche ou de roche solide; celle qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure conviendra pour la maçonnerie, celle qui sera faite avec une pierre poreuse, pour les enduits».³⁸ Le syntagme *de albo saxo aut silice* peut se traduire par «à partir de pierre blanche ou de roche solide» ou «à partir d'une pierre blanche, qu'elle soit tendre ou dure», puisqu'en latin, l'adjectif épithète de plusieurs noms s'accorde avec le plus proche: c'est ainsi que dans son édition de Vitruve, Morris H. Morgan traduit *de albo saxo aut silice*.³⁹ D'après J. André, l'adjectif *albus* est «le blanc

³⁵ J.-P. Adam, *op. cit.* p. 76.

³⁶ M. Frizot, *op. cit.*, p. 328.

³⁷ Vitruve, *De l'architecture*, livre 2, édit. Louis Callebaut, Pierre Gros et Catherine Jacquemard, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1999, n. 2, p. 92.

³⁸ Vitr. 2, 5, 1: *De harenae copius cum habeatur explicatum, tum etiam de calce diligentia est adhibenda uti de albo saxo aut silice coquatur; et quae erit ex spisso et duriore erit utilis in structura, quae autem ex fistuloso, in tectoriis.*

³⁹ Vitruvius, *The Ten Books on Architecture*, edit. Morris Hicky Morgan, Londres, 1914: «Sand and its sources having been thus treated, next with regard to lime we must be careful that it is burned from a stone which, whether soft or hard, is in any case white».

dépourvu d'éclat» et il s'oppose à *candidus* «blanc éclatant».⁴⁰ *Albus* désigne en latin des teintes claires, par opposition aux teintes sombres ou noires: clair, blanc, pâle, gris, grisâtre, voire jaunâtre (*albus equus* «cheval à la robe d'un blanc-sale, jaunâtre»). Pourrait être donc être qualifié *d'albus saxum*, le calcaire compact blanchâtre de Varese ou celui de Segni, et le marbre grisâtre de Carrare. A l'inverse peut être qualifiée de *silex* «pierre dure» toute calcaire dur, quelle que soit sa couleur: le calcaire compact de Varese est à la fois *silex* et *albus saxum*. On peut alors considérer que le syntagme *de albo saxo aut silice* désigne n'importe quelle pierre calcaire (marbre, dolomie, calcaire marneux, etc.), bonne à calciner.

En revanche, le calcaire de l'expérience vitruvienne a sa place dans la distinction que fait notre auteur des chaux pour le gros oeuvre et pour les enduits. En effet, la chaux hydraulique, pour le bâtiment et les fondations, est issue de pierre compacte et assez dure [*ex spisso et duriore*] et cette description correspond au calcaire compact, qui contient autour de 20 et 25% de silice. La chaux issue de pierres poreuses [*ex fistuloso*], donnera une excellente chaux aérienne, pour les enduits.

Les chaux mentionnées par Pliny l'Ancien

Ecrivant à peu près un siècle après Vitruve, Pliny (*nat.* 36, 174) donne une liste plus vaste des pierres calcaires que l'architecte théoricien. D'abord, «Caton le censeur condamne la chaux tirée de pierres de couleurs différentes [*e vario lapide*]. La meilleure est extraite de la pierre blanche [*ex albo melior*]». Cette condamnation de Caton pouvait valoir pour la dolomie et non pas pour un calcaire siliceux ou argileux, qui aurait donné une chaux hydraulique, satisfaisante pour Caton. En effet, la dolomie exige un temps d'extinction beaucoup plus long que la chaux normale:⁴¹ si cette chaux dolomitique ou magnésique contient des nodules et est employée en enduit, ces nodules, en continuant leur extinction, gonflent et fissurent l'enduit.

Puis en 36, 174, Pliny reprend la distinction de Vitruve, datant du premier siècle avant J.-C., correspondant aux chaux hydrauliques pour les bâtiments et aux chaux grasses pour les enduits: «La chaux provenant de pierre dure [*(lapide) duro*] est davantage indiquée pour la construction [*structurae utilior*], celle issue de pierres poreuses [*ex fistuloso*] davantage pour les enduits [*tectoriis*]». Cette distinction vitruvienne sera encre reprise par Faventinus et Palladius.⁴²

Mais là où Pliny se démarque de ses prédécesseurs (Caton l'Ancien et Vitruve), c'est lorsqu'il ajoute cette précision: *ad utrumque damnatur ex silice* «Pour l'un et l'autre usage,

⁴⁰ J. André, *Etude sur les termes de couleurs dans la langue latine*, Paris, 1949; pour *albus* p. 25-31, et pour *candidus*, p. 31-38.

⁴¹ David Moore, *op. cit.*, p. 49-69.

⁴² Cet. Fav. 9: *Calx itaque de albo saxo vel Tiburtino aut columbino fluviatili coquatur aut rubro aut spongea. Quae enim erit ex spisso et duro saxo, utiliter structuris conveniet. Quae autem ex fistuloso aut exiliore lapide fuerit, conveniet operi tectorio. In commixtione ad duas partes harenae una calcis mittatur. In fluviatili autem harena si tertiam partem testae cretae addideris, miram soliditatem operis praestabit. Pallad. 1, 10, 3: Calcem quoque albo saxo duro uel Tiburtino aut columbino fluuiatili coquemus aut rubro aut spongea aut postremo marmore. Quae erit ex spisso et duro saxo structuris conueniet; ex fistuloso uero aut molliori lapide tectoriis adhibetur utilius.*

on rejette celle provenant de la silice».⁴³ La traduction de J. André reste vague, car il reprend en partie la traduction et le commentaire de K.C. Bailey. Celui-ci renonce, dans le paragraphe 168, à trouver en anglais un équivalent à *silex*, car il semble impossible de trouver une traduction satisfaisante.⁴⁴ De plus, le commentaire de 36, 174 issu du traducteur anglais D.H. Eichholz, qui a établi l'édition des livres 36 et 37 de l'«Histoire Naturelle» de Pline dans la «Loeb Classical Library», indique que *ex silice* peut désigner un tuf calcaire, ce qui est logique pour fournir de la chaux et non pas une lave ou des pierres volcaniques.⁴⁵ Mais pourquoi Pline condamne-t-il la chaux tirée du *silex*, alors que Vitruve la recommande?

Nous avons vu que chez Vitruve, un calcaire compact, fournissant une chaux hydraulique, pouvait être désigné par *silex*. Depuis Vitruve, l'activité éditilite d'Auguste puis de ses successeurs a changé la physiologie de Rome. J.P. Adam écrit qu'une standardisation des matériaux de construction avait commencé avec l'arrivée d'une main-d'œuvre servile à la suite des victoires de Rome sur ses ennemis (secondes et troisièmes guerres puniques; contre les Grecs et les Macédoniens: 197, 190, 146; contre l'Espagne en 133): main-d'œuvre qu'on put mettre au travail pour l'extraction de la pierre et la taille des moellons. Cette standardisation s'est ensuite appliquée aux autres matériaux (moellons, briques, etc.): les Romains vont ensuite faire de l'architecture «jusqu'alors réservée essentiellement aux sanctuaires et aux fortifications, un art universel, dont le temps d'exécution va devenir incroyablement court».⁴⁶ De fait, les réalisations les plus impressionnantes de la maçonnerie concrète, comme le Colisée finalement inauguré en 80⁴⁷ ou comme le second Panthéon et sa formidable coupole (construit entre 118 et 125),⁴⁸ pour ne citer que ces deux exemples, sont le résultat d'une évolution de la technique et de la généralisation d'un mortier de type *opus signinum* ou de type «sable volcanique». Dès l'époque de Néron, la généralisation de la brique et de la terre cuite pilée permet le développement de l'*opus testaceum*, symbolisant l'architecture impériale romaine.⁴⁹

La standardisation peut s'être appliquée aussi sur le chaux car, Pline le Naturaliste, (*nat.* 36, 174) augmente la liste des calcaires et celle-ci fournit surtout des chaux aériennes: «Préférable est la chaux faite de pierres extraites à celle provenant de pierres ramassées sur les rives des cours d'eau. La meulière fournit une chaux meilleure parce que sa nature est plus grasse».⁵⁰ On trouve des listes similaires chez Palladius et Faventinus, même si Pline et ses successeurs conservent la distinction des chaux pour le

⁴³ Pline l'Ancien, *Histoire Naturelle*, livre 36, édit. J. André, R. Bloch, A. Rouveret, Collection des Universités de France, Belles-Lettres, Paris, 1981; *Plin. nat.* 36, 174: *Calcem e uario lapide Cato censorius improbat; ex albo melior. Quae ex duro, structurae utilior; quae ex fistuloso, tectoriis; ad utrumque damatur ex silice.*

⁴⁴ K.C. Bailey, *The Elder Pliny's Chapters on Chemical Subjects*, Arnold, London, 1932, tome 2, p. 271.

⁴⁵ Pliny, *Natural History*, X, *Libri XXXVI-XXXVII*, édit. D.E. Eichholz, Loeb Classical Library, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1989, p. 136, note c.

⁴⁶ J.P. Adam, *op. cit.*, p. 83-84.

⁴⁷ Filippo Coarelli, *Guide archéologique de Rome*, Hachette, Paris, p. 131.

⁴⁸ J.P. Adam, *op. cit.*, p. 83-84.

⁴⁹ J.P. Adam, *op. cit.*, p. 157-163.

⁵⁰ *Plin. nat.* 36, 174: *Vtilior eadem effosso lapide quam ex ripis fluminum collecto, utilior e molari, quia est quaedam pinguior natura eius. Mirum aliquid, postquam arserit, accendi aquis.*

bâtiment et pour les enduits. La standardisation de la chaux a peut-être eu pour conséquence de développer l'emploi de la chaux aérienne et c'est pourquoi Pline, en reflétant cette évolution technique, refuse de prendre le *silex* pour faire de la chaux, mais plutôt d'autres pierres.

Conclusion

Vitruve, remarque qu'après la cuisson, les pierres calcaires perdent un tiers de leur poids [*circiter tertia parte ponderis*]. Cette constatation est l'indice de la calcination d'un calcaire contenant autour de 20% de silicates: il s'agit bien d'une chaux moyennement hydraulique. Or notre architecte a bien conscience du caractère hydraulique de la chaux et recommande un calcaire compact siliceux pour l'édification des murs, car le classement qu'il donne en 2, 5, 1 des usages ressemble à celui, moderne, de la distinction chaux aérienne et hydraulique: «Une fois traitée la question des différents sables que l'on trouve, on s'intéressera plus particulièrement aussi à la chaux: celle-ci doit être obtenue par calcination de pierre blanche ou de roche solide; celle qui sera faite avec une pierre compacte et assez dure conviendra pour la maçonnerie, celle qui sera faite avec une pierre poreuse, pour les enduits».⁵¹

H.-O. Lamprecht, spécialiste allemand connu pour l'étude des mortiers anciens, écrit qu'il faut tenir compte de plusieurs facteurs lorsque l'on fait le mortier pour l'*opus caementicium*: la chaux, et les adjuvants hydrauliques. Vitruve indique que c'est le calcaire le plus blanc qui produit la meilleure chaux pour le bâtiment. Mais pour H.-O. Lamprecht cette remarque ne peut s'appliquer qu'à la chaux aérienne, puisqu'une chaux hydraulique ou très hydraulique, exige, comme matière première, un calcaire argileux, donc impur et coloré.⁵²

Les experts modernes n'ont pas vu que le calcaire compact de Vitruve était un calcaire siliceux et c'est pour cela qu'ils en déduisent que le raisonnement de Vitruve est faux. Or celui-ci recommande ce calcaire siliceux précisément pour l'édification des murs, ce qui suppose le caractère fortement hydraulique exigé par H.-O. Lamprecht. Il est curieux que les experts n'aient pas fait plus attention à la constatation de Vitruve indiquant, qu'au cours de la cuisson, les pierres calcaires perdent un tiers de leur poids [*circiter tertia parte ponderis*]. Ils auraient ainsi très vite compris que Vitruve connaissait et recommandait l'usage de cette chaux hydraulique pour le bâtiment.

La distinction de la chaux hydraulique et chaux aérienne (distinction des chaux pour le gros oeuvre et pour les enduits) est reprise par les auteurs postérieurs à Vitruve. Mais avec Pline le Naturaliste, on constate un élargissement de la liste des calcaires, qui fournissent essentiellement de la chaux aérienne. Cette standardisation de la chaux

⁵¹ Vitr. 2, 5, 1: *De harenae copiis cum habeatur explicatum, tum etiam de calce diligentia est adhibenda uti de albo saxo aut silice coquatur; et quae erit ex spisso et duriore erit utilis in structura, quae autem ex fistuloso, in tectoriis.*

⁵² H.-O. Lamprecht, *Opus caementitium, Bautechnik der Römer*, cinquième édition corrigée, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1996, p. 44-45: «Welche Gesichtspunkte waren bei der Mörtelherstellung für das *opus caementitium* zu beachten? Die Funktion des Bindemittels übernehmen der gebrannte Kalk und häufig hydraulische Zusätze. Vitruv geht davon aus, daß der reinste (weiße) Kalkstein den besten Baukalk ergibt. Diese Meinung ist jedoch nur für Luftkalk zutreffend, da ein hydraulischer oder ein hochhydraulischer Kalk einen tonhaltigen –also nicht reinen– Kalkstein als Ausgangsprodukt erfordert».

aérienne se reflète donc dans le texte de Pline. On constate alors, que, depuis Caton jusqu'à Palladius et Faventinus, il y a une évolution dans la description des calcaires qui doit être le reflet de l'évolution de la technique des mortiers: la chaux aérienne prend le pas sur la chaux hydraulique.

Voilà ce que l'étude des textes anciens peut apporter à la connaissance de l'histoire des techniques. Or, la présence de chaux hydraulique dans les mortiers antiques reste à confirmer et il faudra attendre que des méthodes complémentaires d'analyses soient mises au point par des archéomètres.

Pourtant, des archéomètres ont analysé des enduits et des mortiers de type *opus signinum* en utilisant non pas un seul type d'analyse (comme la microscopie optique) mais tout un ensemble (microscopie optique; microscopie électronique à balayage; microsonde électronique; analyse chimique quantitative; diffraction aux rayons X; absorption aux infrarouges). Ils ont pu déterminer grâce à cela, que le liant de type *opus signinum* contient, en plus de la calcite, des silicates d'alumines hydratés provenant de la réaction pouzzolanique entre la brique pilée (*testa*) et la chaux.⁵³ Il faudra donc attendre pour la chaux hydraulique que les méthodes archéométriques soient au point, peut-être en utilisant les outils qui furent employés pour *l'opus signinum*.

Frédéric Davidovits,
[CERLA, Université de Caen]
16 rue Galilée,
F-02100 Saint Quentin,
France

⁵³ F. Rassinoux, A. Meunier, J.C. Petit, «Ancient Analogues of Modern Cement: Calcium Hydrosilicates in Mortars and Concretes from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France», *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 72 [6], 1989, p 1026-1032.