



**HAL**  
open science

**Pierres, mortiers et parements de la tour des Minimes  
au regard du compte de construction de 1495-1496, des  
investigations archéologiques et des analyses  
pétrographiques**

Lucie Gaugain, Jean-Gabriel Bréhéret, Jean-Michel Mechling, Daniel Prigent

► **To cite this version:**

Lucie Gaugain, Jean-Gabriel Bréhéret, Jean-Michel Mechling, Daniel Prigent. Pierres, mortiers et parements de la tour des Minimes au regard du compte de construction de 1495-1496, des investigations archéologiques et des analyses pétrographiques. *Archeosciences, revue d'Archéométrie*, 2017, 41 (1), pp.25-43. 10.4000/archeosciences.4868 . halshs-01777896

**HAL Id: halshs-01777896**

**<https://shs.hal.science/halshs-01777896>**

Submitted on 11 Jun 2021

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

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



**ArcheoSciences**  
Revue d'archéométrie  
41-1 | 2017  
Varia

---

## Pierres, mortiers et parements de la tour des Minimes au regard du compte de construction de 1495-1496, des investigations archéologiques et des analyses pétrographiques

Amboise Tour des Minimes stones, mortars and facing of walls.  
Comparative study of the 1495-1496 account book, archeology research and petrographic analysis

**Lucie Gaugain, Jean-Gabriel Bréheret, Jean-Michel Mechling et Daniel Prigent**

---



### Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/4868>  
DOI : 10.4000/archeosciences.4868  
ISSN : 2104-3728

### Éditeur

Presses universitaires de Rennes

### Édition imprimée

Date de publication : 21 juin 2017  
Pagination : 25-43  
ISBN : 978-2-7535-5890-8  
ISSN : 1960-1360

### Référence électronique

Lucie Gaugain, Jean-Gabriel Bréheret, Jean-Michel Mechling et Daniel Prigent, « Pierres, mortiers et parements de la tour des Minimes au regard du compte de construction de 1495-1496, des investigations archéologiques et des analyses pétrographiques », *ArcheoSciences* [En ligne], 41-1 | 2017, mis en ligne le 21 juin 2019, consulté le 21 décembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/archeosciences/4868> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4868>

---

# Pierres, mortiers et parements de la tour des Minimes au regard du compte de construction de 1495-1496, des investigations archéologiques et des analyses pétrographiques

*Amboise Tour des Minimes Stones, Mortars and Facing of Walls  
Comparative Study of the 1495-1496 Account Book, Archeology Research  
and Petrographic Analysis*

Lucie GAUGAIN<sup>a</sup>, Jean-Gabriel BRÉHERET<sup>b</sup>, Jean-Michel MECHLING<sup>c</sup>  
et Daniel PRIGENT<sup>d</sup>

**Résumé :** Le chantier de Charles VIII (1483-1498) au château d'Amboise se déroula entre 1492 et 1498. L'année 1495-1496 est documentée par un livre de compte concernant notamment la tour cavalière des Minimes, aujourd'hui bien conservée. L'étude croisée du bâti, du livre de compte, des pierres de taille (pétrographie et statistique), des mortiers (granulométrie et analyses de la chaux) et du badigeon recouvrant les joints a nécessité la mise en place d'une méthodologie précise, demandant de continus échanges entre historiens de l'architecture, géologues et archéologues. Ces investigations permettent d'identifier les dénominations des pierres et le vocabulaire technique en usage à la fin du Moyen Âge. Mais bien au-delà, elles démontrent l'intervention probable d'un appareilleur, l'organisation du chantier régit en plusieurs pôles et ateliers, ainsi que son rythme très soutenu puisque, pour la seule tour, plus de 15 m de maçonneries voûtées furent élevées. Ce fut possible grâce à la connaissance empirique des matériaux qu'avaient les hommes œuvrant à la construction, à la qualité des matériaux employés et à la remarquable mise en œuvre qui en fut faite. Il en résulte un ouvrage hors du commun, d'une rare audace où quatre révolutions et demie de voûtes d'ogives montent autour d'un noyau creux.

**Abstract:** Charles VIII (1483-1498) construction period in the castle at Amboise took place from 1492 to 1498. In 1495-1496, an account book was written mainly about the well-preserved Tour des Minimes, a tower one could climb up on horseback. A comparative study of the building, along with the account book, cut stones (petrography and statistics), mortars (grain size distribution and lime) and the whitewash jointing, requires a specific methodology and a constant dialogue between architectural historians, geologists, and archaeologists. The research enables to identify the name of the stones and the technical vocabulary used at the end of the middle ages. Moreover, it proves that a chief stone dresser probably worked on the tower, and that the building site was likely to have been split into several centres and workshops; and it also reveals the rhythm of work to have been intense, since for the tower only, more than 15m of vaulted masonry had been created. All this has been allowed thanks to workers with an empirical knowledge of materials, the high quality of the chosen materials and the remarkable implementation they did. It resulted in an outstanding genuine edifice in which four revolutions and a half climb around an openwork newel.

**Mots clés :** architecture, tuffeau, archéologie du bâti, appareil, mortier, chantier, comptabilité, pétrographie.

**Keywords:** architecture, tuffeau, archaeology, bond, mortar, building site, accounts, petrography.

<sup>a</sup> Enseignante en Histoire de l'Art à l'université François-Rabelais de Tours, Docteure en Histoire de l'Art, Chercheuse associée au CESR – UMR/CNRS 7323, Chercheuse invitée de l'INHA, Ingénieure d'études au CESR.

<sup>b</sup> Professeur de Géologie, université François-Rabelais de Tours, EA 6293, Laboratoire GéHCO.

<sup>c</sup> Maître de conférences, université de Lorraine, Institut Jean-Lamour, UMR/CNRS 7198, Équipe Matériaux pour le Génie Civil (Nancy – France).

<sup>d</sup> Pôle archéologique, Service du Patrimoine, Conseil départemental de Maine-et-Loire, Chercheur associé de l'UMR 6298 ArTeHiS.

## 1. INTRODUCTION : PRÉSENTATION ET ENJEUX DE L'ÉTUDE

Le compte de construction du château d'Amboise couvre la période octobre 1495-septembre 1496. Constitué de 285 folios, il livre nombre de renseignements sur l'organisation du chantier, son rythme, les acteurs et les matériaux mis en œuvre. Cependant, pour ces derniers, si les quantités sont précisément décomptées, leur destination apparaît bien rarement, en particulier pour la pierre. Les onze lieux d'extraction de la pierre mentionnés dans le texte peuvent être localisés avec une relative exactitude<sup>1</sup> (figure 1). L'ensemble des pierres provenant de Saint-Aignan (Loir-et-Cher), Les Terriz (Loir-et-Cher), Bourré (Loir-et-Cher), Belleroche (Loir-et-Cher), Lussault (Indre-et-Loire), Malvau (Indre-et-Loire), Les Caves (Indre-et-Loire), Limeray (Indre-et-Loire) et Saumur (Maine-et-Loire) est livré au port d'Amboise, à l'exception de la pierre de La Ronde, dite « pres Loches<sup>2</sup> », dévolues aux marches notamment, qui est acheminée par la route, par l'un des trois maîtres-maçons en charge du chantier, Louis Amangeart.

Au cours de l'année 1495-1496, plusieurs secteurs du château sont en travaux. Le livre de compte conservé est en réalité le 4<sup>e</sup> tenu par Alixandre Blandin. Les informations sur les rouages du chantier sont souvent elliptiques, car les premières années de comptabilités sont généralement plus précises que les suivantes en raison du caractère nouveau que recouvre pour le scripte la mise en place du chantier. De fait, la localisation des travaux s'envisage donc à travers quelques détails : les pierres à fontaine indiquent les travaux aux jardins, des marches particulièrement longues, la construction d'un grand escalier en vis et, des travaux de couverture, l'achèvement du gros œuvre du logis des Sept Vertus. En ce qui concerne la tour des Minimes (figure 2), l'observation croisée de la mise en œuvre des baies et des achats prouve que les deux tiers de la tour sont édifiés au cours de cette année. Au début du compte, 50 pelles sont achetées pour curer les douves de la « tour encomancée au Petit Fort<sup>3</sup> », soit la tour des Minimes ; puis à l'hiver 1495-1496, la commande de « deux grans portes de fer pour servir à la porte et entree de la grosse tour encom-

mencée à faire au Petit Fort<sup>4</sup> » pour fermer la tour démontre que la construction doit se situer autour du niveau de la rue des Minimes (actuelle rue de la Concorde) lorsque la tenue du compte débute. Enfin, au cours des deux derniers trimestres de l'année, sur les 17 grilles que compte la tour, 11 sont commandées en deux lots<sup>5</sup>. Or ces grilles sont nécessairement scellées dans la maçonnerie concomitamment à l'assemblage de celle-ci. Pour le seul secteur de la tour des Minimes, ce sont donc près de 59 assises de maçonnerie, dont 47 intérieures<sup>6</sup>, qui sont construites entre octobre 1495 et septembre 1496, soit 15,50 m de maçonnerie depuis le niveau de la rue de la Concorde. Au cours du 1<sup>er</sup> rôle, entre octobre et décembre 1495, le talus de la tour est élevé, ce qui explique les livraisons de tuffeau jaune. Au cours du 2<sup>e</sup> rôle, l'intérieur de la tour est commencé (le tuffeau provient essentiellement de Bourré). Au cours du 3<sup>e</sup> rôle, cinq grilles sont commandées, la 5<sup>e</sup> se trouvant à hauteur de la 25<sup>e</sup> assise environ. Au cours du 4<sup>e</sup> rôle, six grilles de baies sont achetées, la 11<sup>e</sup> baie se trouvant à hauteur de la 47<sup>e</sup> assise environ. Enfin au cours des deux derniers rôles, les enduiseurs sont employés à « joindre et bauchir les voultres de la montee de la grosse tour<sup>7</sup> ».

La tour des Minimes répond au modèle particulièrement rare des tours cavalières<sup>8</sup>. Autour d'un noyau creux à 16 pans, percé de baies, montent à main gauche quatre révolutions et demie de rampe voûtées de 58 travées d'ogives et éclairées de baies sur l'extérieur. La tour montre un diamètre de 21 m hors-tout<sup>9</sup> pour une hauteur de 22 m. Ses murs atteignent 3,20 m d'épaisseur. Le double couronnement de l'ouvrage est toutefois issu des restaurations des architectes Ruprich-Robert à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du siècle suivant. En revanche, jusqu'à sa 65<sup>e</sup> assise, la tour ne présente que des restaurations ponctuelles. Elle est construite en moyen appareil de tuffeau, en assises réglées à l'extérieur mais non à l'intérieur où l'on observe de nombreux décrochements (figure 3). Les maçonneries sont liées au mortier de sable et de chaux et les joints reçoivent un badigeon blanc (figure 8).

4. *Ibid.*, f<sup>o</sup> 153 r<sup>o</sup>.

5. *Ibid.*, f<sup>o</sup> 219, 272 v<sup>o</sup>-273 r<sup>o</sup>.

6. Le talus compte 12 assises. Au niveau du talus, pris dans la douve, se développe une galerie de contremine, assez remaniée et qui emploie ponctuellement la brique.

7. Archives Nationales, série KK, *Compte de construction du château d'Amboise (1495-1496)*, f<sup>o</sup> 215 r<sup>o</sup>.

8. Il n'en existe que 5 en Europe : 2 à Amboise, 1 à Urbino (Italie, v. 1480), 1 à Rome au château saint-Ange (antique), 1 à Orvieto (1527) et 1 en Allemagne, à Albrechtsburg de Meissen (1481-1485), mais d'un type différent puisqu'il s'agit d'une vis pourvue de marches tournant autour d'un noyau creux. Enfin, le grand escalier de Chambord (v. 1520) s'inscrit également dans la mouvance de ce modèle.

9. Le diamètre atteint 26,9 m au niveau du talus.

1. S'il est possible de travailler à l'échelle de la commune, il est en revanche impossible de proposer d'identifier les carrières. La carte de localisation des carrières est publiée (Gaugain, 2014 : XVIII, fig. 35 CC).

2. Le toponyme le plus proche reste Céré-la-Ronde (Indre-et-Loire), qui dispose d'anciennes carrières à La Ronde, mais on emprunte le pont de Chédigné (Indre-et-Loire) et non la route de Montrichard (Loir-et-Cher) pour aller la chercher, ce qui ne semble pas logique sauf à ce que le charretier (Jean Gandillon, Martin Palu ou Pierre Davy) ait habité du côté de Chédigné, située à une dizaine de kilomètres de Céré.

3. Archives Nationales, série KK, *Compte de construction du château d'Amboise (1495-1496)*, f<sup>o</sup> 89 r<sup>o</sup>.

Figure 1 : Carte de localisation des lieux d'approvisionnement en pierre et en chaux (© L. Gaugain).  
 Figure 1: Map of the stone and lime supply (© L. Gaugain).

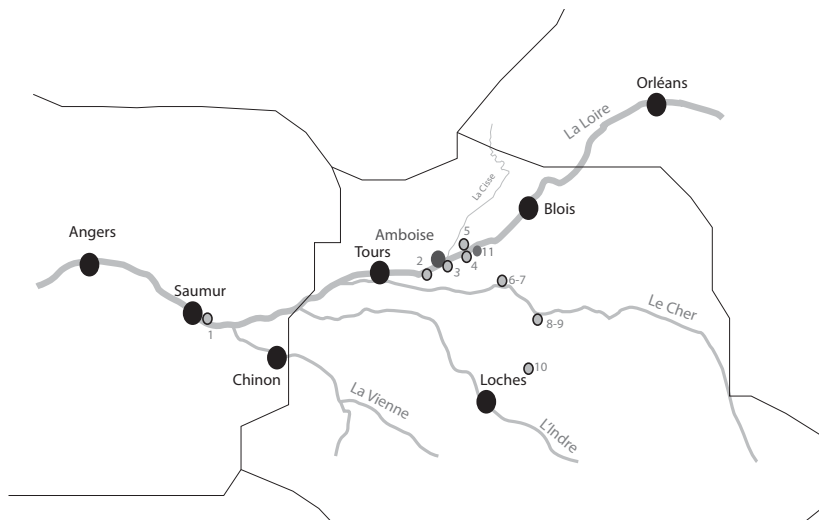


Figure 2 : Vue de la tour des Minimes du château d'Amboise depuis la rue de la Concorde (© L. Gaugain).  
 Figure 2: View of the Tours des Minimes in the Amboise castle from rue de la Concorde (© L. Gaugain).



Figure 3 : (Voir planche couleur V) Vue de la rampe cavalière de la tour des Minimes du château d'Amboise (© L. Gaugain).  
 Figure 3: (See colour plate V) View of the ramp in the Tour des Minimes of the Amboise castle (© L. Gaugain).

Si le compte répond à certaines interrogations, il en est d'autres qui restent sans réponse. Sur les 11 provenances de pierres employées au chantier du château, toutes ne sont pas mises en œuvre à la tour des Minimes. L'examen macroscopique permet en effet de distinguer 5 faciès : des pierres jaunâtres à gros grain, des pierres blanches à grain fin, des pierres blanche-grise à grain fin, des pierres qui ont rosé et d'autres qui ont verdi. Et si un même faciès macroscopique peut se retrouver dans deux carrières proches, nous verrons que l'observation au microscope électronique à balayage (MEB), couplée au décompte *in situ* et à l'analyse du compte confirment cela. En ce qui concerne le mortier, la chaux provient de Rilly-sur-Loire (Loir-et-Cher), tandis que le sable est tiré de la Loire. Mais on ne connaît, de par le texte, ni la nature exacte de la chaux, ni le mode de préparation du mortier. L'enjeu de cette étude est de montrer comment et dans quelle mesure les études géologique, pétrographique, granulométrique et statistique permettent de corréliser les sources écrites et l'analyse du bâti. Ainsi, nous verrons qu'il est possible d'identifier la dénomination des pierres citées par le compte, d'envisager les usages spécifiques des pierres en fonction de leur provenance, de déterminer l'organisation de la taille des pierres ainsi que les procédés de mise en œuvre, de caractériser les pierres, le sable et la chaux et, enfin, de distinguer les choix techniques des constructeurs de leurs choix esthétiques.

## 2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le protocole scientifique a suivi 5 étapes. Premièrement, nous avons transcrit et regroupé sous forme de tableau les données textuelles du compte de 1495-1496. Deuxièmement, nous avons réalisé sur les parements intérieurs de la tour des Minimes des mesures d'appareil systématiques de tous les parements accessibles, depuis la rampe, entre la 1<sup>re</sup> et la 63<sup>e</sup> assises<sup>10</sup>, soit environ 1 600 pierres mesurées (Prigent, 1989)<sup>11</sup>. Troisièmement, en vue d'analyse granulométrique nous avons procédé à des prélèvements de mortiers toutes les cinq assises dans la rampe et à l'intérieur du noyau – alors échafaudé – au niveau des pierres d'appareil, des baies, des pierres d'angles des ébrasements de baies et au contact de différents faciès de pierre identifiables macroscopiquement (tableau 4). Quatrièmement, nous avons réalisé d'autres prélèvements de mortiers superficiels afin de

10. Les parements extérieurs et de l'intérieur du noyau n'ont donc pas été mesurés faute d'accès. Les douze assises du talus n'ont pas été prises en considération non plus.

11. Pour chaque pierre ont été mesurés, au millimètre près, sa longueur et sa largeur, l'épaisseur de son joint de lit et celle du son joint montant.

conserver le badigeon qui le recouvre. Ces prélèvements ont permis de réaliser des lames minces d'une épaisseur légèrement supérieure à la valeur conventionnelle de 30  $\mu\text{m}$  pour éviter tout risque de disparition (biseau, arrachage, etc.) de la fine pellicule d'enduit appliquée en badigeon sur le mortier des joints. Enfin, cinquièmement, 20 carottes de tuffeau (5 à 6 cm de long pour 20 mm de diamètre) ont été prélevées dans les parements intérieurs (noyau et rampe) en veillant à échantillonner chacun des faciès et chacun des types de pierres (« quartiers » « corbeaux », « ogives », « clervoyes », « blotz »...). Après numérotation systématique des assises – qui par endroit se dédoublent –, l'ensemble des échantillons a été numéroté et les emplacements des prélèvements ont été photographiés.

## 3. ÉTUDE DES PIERRES : DÉNOMINATION DANS LE LIVRE DE COMPTE ET CARACTÉRISTIQUES PÉTROGRAPHIQUES

Outre les lieux d'approvisionnement en matériaux, le livre de compte mentionne le nom des différentes pierres mises en œuvre. Parmi les 15 dénominations rencontrées dans le texte, 9 se rencontrent dans la tour des Minimes : « quartier », « augives », « clefs », « blotz », « demi blotz », « pierres pendant », « doubleaux », « clervoyes » et « corbeaux ». Si certains termes s'entendent naturellement, les « blotz », « demi blotz », « pierres pendant » et « corbeaux » s'identifient quant à eux en confrontant le décompte des pierres *in situ* (tableau 1) aux analyses pétrographiques – nous y reviendrons.

Le livre de compte permet de proposer que les pierres en œuvre dans la tour des Minimes proviennent de quelques carrières reconnues comme étant les sources pour deux types de faciès identifiés et rapportés à deux formations du Turonien qui constituent le *substratum* de la région : le Tuffeau Blanc ou Tuffeau de Bourré et le Tuffeau Jaune de Touraine.

L'étude a nécessité l'extraction de mini-carottes à l'aide d'une perceuse munie d'un cylindre de bronze diamanté. Les carottes ont un diamètre de 20 mm pour une longueur de l'ordre de 5 à 6 cm (selon les possibilités d'extraction). De manière générale, les roches mises en œuvre dans le bâtiment correspondent à des faciès mixtes, c'est-à-dire à la fois détritiques terrigènes (présence de grains minéraux d'origine continentale, principalement le quartz) et bioclastiques (présence de débris de squelettes d'organismes marins divers). Ces roches ont pour origine des sédiments marins déposés entre 93 et 88 millions d'années sur le fond de la mer peu profonde qui occupait le Bassin parisien. Ce sont des sables fins à moyens soudés par des ciments précipités au cours de

la diagenèse (processus physicochimiques qui s'opèrent au sein du sédiment après son dépôt). Les échantillons ont fait l'objet de mesures du taux de carbonate de calcium, d'observations en microscopie optique (microscope polarisant) sur lames minces et en microscopie électronique à balayage.

### Pierres rapportées au Tuffeau Blanc

Ces pierres proviendraient de Belleroche pour les échantillons 2, 7 et 11 d'une part et de Saint-Aignan ou Les Terriz pour les échantillons 8, 12, 14, 16 et 19 et 20 d'autre part.

Les teneurs en carbonates sont comprises entre 53 et 77 %. La granularité est fine; la roche étant composée de grains de sable fin et de limons (ou *silt*; c'est-à-dire < 63 µm) peut être qualifiée de *calcarénite* fine voire de *calcisiltite*. Étant donné la relative faible proportion de matrice très fine (argile du point de vue granulométrique) la texture peut être qualifiée de *grainstone*, voire de *siltstone*. La cimentation incomplète laisse subsister une certaine porosité largement responsable de la fragilité de la roche (figure 4, A-B).

La composition minéralogique est dominée par la calcite (CaCO<sub>3</sub>) sous forme de bioclastes, de grains composés de minuscules cristaux (micrite) qualifiés de *pellets*, de grains sparitiques remaniés et de ciments sous forme de cristaux plus ou moins larges (sparite, ou microsparite). Le quartz d'origine détritique se trouve en moindres quantités. La muscovite est présente en petites proportions. Les paillettes brillantes de ce minéral sont à l'origine d'une ancienne appellation de ce faciès en tant que craie micacée. La calcédoine (quartz nanocristallin organisé en fibres très fines, d'origine diagénétique) est rarement représentée (éch. 2 et 8), soulignant l'emplacement de bioturbations. La glauconie est fréquente (grains vert foncé formés d'une argile micacée riche en fer, d'origine diagénétique). Des traces d'hydroxydes de fer, parfois identifiées, sont en partie la conséquence de l'altération de ce minéral.

Pendant l'opale CT (pour cristobalite-tridymite) constitue une phase minérale caractéristique de ce tuffeau blanc (figure 5, A-C, E). En tant que ciment, elle peut être fréquente comme dans l'échantillon 20, mais envahir très largement la porosité initiale de la roche comme dans les échantillons 7, 14, 16 et 19. Dès lors, elle explique la relative faible teneur en calcaire de ces échantillons. Par ailleurs, c'est à sa présence massive que l'on doit la blancheur particulière au tuffeau blanc et qui, par la finesse de son grain, l'a fait confondre avec une craie véritable. Le minéral se présente dans la roche (comme d'ailleurs le plus habituellement) sous forme de sphérules d'une taille de l'ordre d'une dizaine de micromètres, à l'aspect hérissé caractéristique car formées

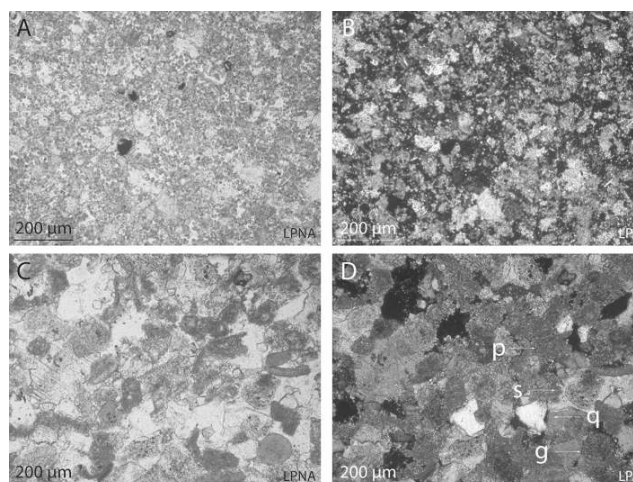


Figure 4. A, B : (Voir planche couleur V) Tuffeau Blanc. Grainstone à grain fin. Les éléments sont liés essentiellement par l'opale CT qui figure sous forme de sphérules sombres en LPNA et invisibles en LPA car isotropes. Les grains noirs, opaques en lumière transmise sont probablement de la pyrite. éch. 16. C, D : Tuffeau Jaune. Grainstone. Ensemble de grains liés par un ciment de sparite. G : glauconie; q : quartz détritique; s : grain de calcite (bioclaste recristallisé) sur lequel le ciment de calcite sparitique s'est développé; p : pellet. éch. 18; Microscopie optique. LPNA : lumière polarisée non analysée; LPA : lumière polarisée analysée (© J.G. Bréheret).

Figure 4 A-B: (See colour plate V) White freestone. Fine-grained grainstone. The elements are mostly bound by the Opal-CT which appears as dark spherical particles in the LPNA view and which are invisible in the LPA view as they are isotropic. The dark grain, opaque in transmitted light are probably pyrite. Sample 16 C, D: Yellow freestone. Grainstone. Grains bound by a sparry carbonate cement. G: glauconite; q: detrital quartz; s: calcite grains (recrystallized bioclast) on which the sparry calcite cement spread; p: pellet. Sample 18; Optical microscopy. LPNA: polarised and unanalysed light; LPA polarised and analysed light (© J.G. Bréheret).

de minuscules écailles de quelques dizaines de nanomètres (d'où l'appellation de lépisphères) des deux minéraux enchevêtrés (figure 5, C). Ce ciment précipite très tôt après la sédimentation; ses microsphères se moultent sur les particules préexistantes du sédiment (figure 2, F). La calcite sparitique précipite plus tardivement, ce que montre la forme de ses cristaux qui épousent celles de l'opale CT, outre celles des autres grains (figure 5, E).

Du point de vue de la composition biogénique, le tuffeau blanc est caractérisé par la fréquence des spicules d'éponges (éch. 2, 7, 8) qui peuvent être abondants : éch. 14, 20. En revanche, les bioclastes identifiables provenant d'autres invertébrés sont relativement rares. Toutefois, les pellets qui correspondent aux déjections des invertébrés pour probablement une large part, sont abondants à très abondants. Par ailleurs, les restes de microorganismes sont assez fréquents.

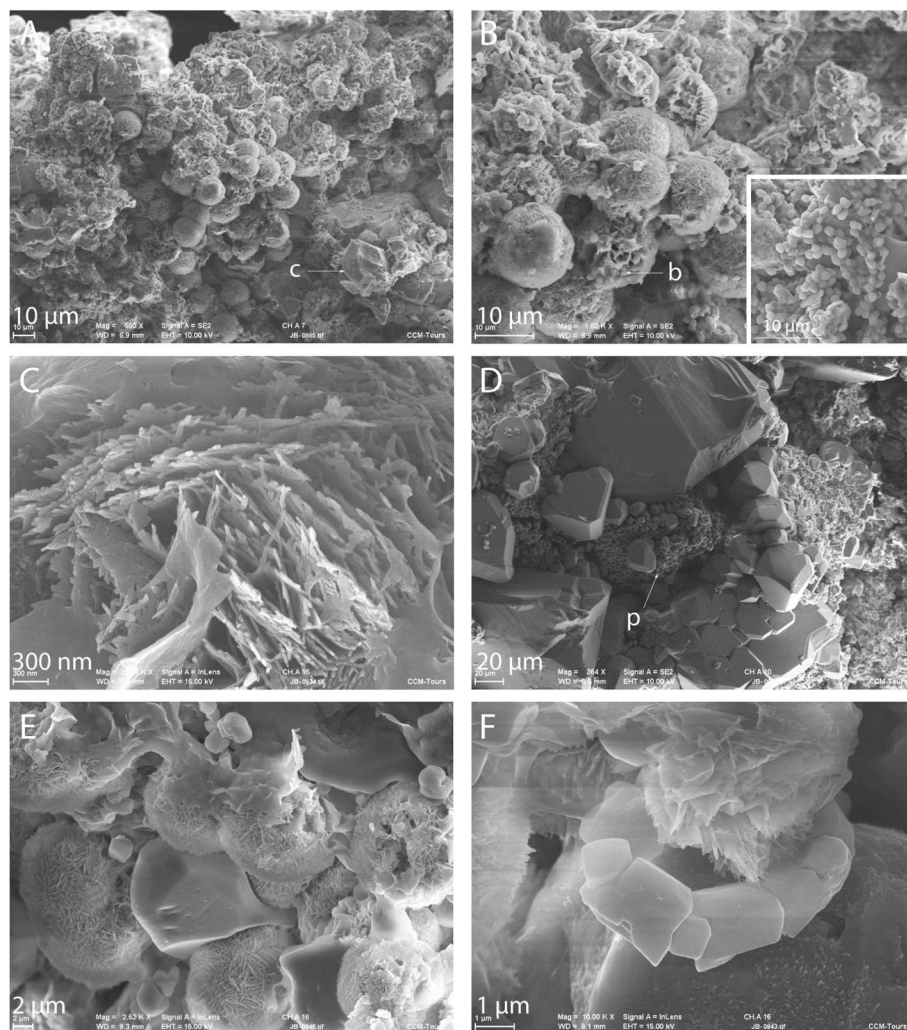


Figure 5 A, B : Tuffeau Blanc. Quelques éléments figurés cimentés par d'abondantes sphérules d'opale CT sur lesquelles se moule (c) des cristaux d'un ciment de calcite (sparrite); quantité de petits clusters de bactéries (b) sont dispersés au sein du sédiment et peuvent être envahissants ainsi que l'illustre le petit encart (éch. 7). C : Détail d'une sphérule d'opale CT (lépisphère) dont les écailles sont formées de cristallites de cristobalite; des feuillettes d'argiles recouvrent partiellement la sphérule (éch. 16). D : Tuffeau Jaune. Ciment largement développé de calcite sparitique liant des pellets (p) formés de calcite microcristalline (micrite) (éch. 10). E : les relations entre les sphérules d'opale CT et calcite sparitique montrent la cristallisation plus tardive de cette dernière (éch. 16). F : un spécimen de coccolithe très recristallisé sur lequel une lépisphère d'opale CT s'est développée (éch. 16). Microscopie électronique à balayage (© J.G. Bréheret).

Figure 5 A, B : *White freestone. Some figurative elements are cemented by abundant spherical Opal-CT on which are moulded (c) some calcite cement crystals (sparry); lots of small clusters of bacteria (b) are spread into the weathering sediment and might overspread as we can see in the small insert (sample 7). C: Detail of a spherical Opal-CT (lepispherical), the chips are of cristobalite crystalline; some*

*clay layer partly cover the sphere (sample 16). D: Yellow freestone. Well-developed sparry calcite cement binding the microcrystalline calcite (micrite) pellets (p) (sample 10). E: the relationship between the opal-CT and sparry calcite spheres proves that the crystallisation took place later in this case (sample 16). F: a much recrystallized coccolith specimen on which an opal-CT lepisphere spread (sample 16). Scanning Electron Microscopy (© J.G. Bréheret).*

Ce sont pour l'essentiel des Foraminifères (unicellulaires du zooplancton, et pour certains du zoobenthos). Les coccolithes (minuscules écailles calcitiques provenant d'algues unicellulaires du nanoplancton, les coccolithophoridées) sont fréquents dans certains échantillons comme le 16 (figure 2, F). La présence de ces différents restes d'organismes atteste l'origine de mer ouverte pour le dépôt des sédiments représentés par le faciès tuffeau blanc. Tant la finesse du grain, que l'homogénéité du faciès et la cimentation par la calcite et la silice, constituent des atouts pour le façonnement de la pierre en sculptures subtilement ciselées à l'instar de ce que l'on peut constater sur les culots et les clefs de voûte ainsi que sur nombre d'édifices de la Renaissance. La porosité qui subsiste confère une relative légèreté à la roche propre à son

utilisation sur d'imposantes structures bien qu'à l'origine d'une altérabilité notable.

### Pierres rapportées au Tuffeau Jaune

Le Tuffeau Jaune proviendrait de Malvau ou Lussault pour les échantillons 3, 9, 13, 14, 17 et 18. Les teneurs en carbonates sont comprises entre 65 et 81 %.

La granularité est celle de grains de sable moyen; la roche peut être qualifiée de calcarénite. La matrice très fine (argile du point de vue granulométrique) fait pratiquement défaut. La texture correspond à un *grainstone* (figure 4, C-D). Comme pour le tuffeau blanc, la cimentation est incomplète



et laisse subsister une porosité importante, mais variable selon les pierres.

La composition minéralogique est largement dominée par la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) sous forme de bioclastes, de grains composés de micrite, les *pellets*, de grains sparitiques remaniés ; le ciment de sparite est présent et peut envahir la porosité initiale (éch. 6, 18 ; figure 5, D). De son importance découle la plus ou moins grande solidité de la roche. Le quartz d'origine détritique est très fréquent à abondant (éch. 13, 15, 17). La muscovite est rare à présente dans certains échantillons (éch. 17). La glauconie est fréquente à très fréquente (éch. 15, 17 ; figure 4, C-D), ce qui explique la présence d'hydroxydes de fer associés à l'altération de ce minéral. En revanche, l'absence d'opale CT est notable.

Le contenu biogénique est caractérisé par la présence de bioclastes d'invertébrés à squelettes calcaires, notamment les fragments de colonies de bryozoaires qui peuvent être fréquents en certains échantillons (éch. 15, 17, 18). Les épines d'échinodermes sont rares à présents, les bioclastes de bivalves sont fréquents seulement dans l'échantillon 18. En revanche, les spicules d'éponges sont totalement absents dans l'ensemble des échantillons analysés. Les pellets sont fréquents à très abondants (notamment dans les échantillons 15, 17, 18). Les foraminifères sont présents à fréquents (éch. 15, 18). En l'absence de recherche systématique (sur préparations spécifiques), la présence de coccolithes n'est pas attestée. La granularité des sédiments, le spectre minéralogique et la nature des restes d'organismes témoignent d'un environnement de dépôt marin peu profond caractéristique du Tuffeau Jaune de Touraine. Cette granularité plus importante que celle du tuffeau blanc ainsi qu'une cimentation substantielle quoique irrégulière confèrent à ces pierres une certaine résistance, mais les rend peu adaptées à la sculpture. C'est la raison pour laquelle elles sont utilisées, sous formes de « quartiers », pour les pans de murs situés entre les ouvertures.

Tuffeau blanc et tuffeau jaune présentent donc des différences notables qui permettent de différencier l'origine géologique des pierres en œuvre dans la tour des Minimes. Ces distinctions permettent de conforter les hypothèses présentées à partir des indications fournies par le livre de compte. Par ailleurs, les échantillons 4, 5 et 6 provenant des pierres blanchâtre à grisâtre du mur intérieur du noyau, d'origine incertaine, peuvent être rattachées au faciès Tuffeau Jaune car ce sont des calcarénites dépourvues de spicules d'éponges et d'opale CT, mais riches en quartz détritique (quoique dépourvues ou très pauvres en fragments de bryozoaires). Cependant, les données présentées ici ne permettent pas de préciser l'origine exacte des carrières qui ont fourni le matériel.

## L'altération des pierres en œuvre

Les pierres échantillonnées proviennent de l'intérieur de la tour et sont donc *a priori* relativement préservées des processus d'altération par les agents atmosphériques. Toutefois, les ouvertures ménagées sur le mur extérieur laissent pénétrer lumière et humidité, ce qui engendre par endroits une colonisation par les organismes photosynthétiques (bactéries, cyanobactéries et algues microscopiques) des pierres soumises à cette influence. Celles-ci présentent une teinte verte caractéristique des pigments photosynthétiques. Cette matière organique est consommée dans les quelques millimètres sous la surface par les bactéries hétérotrophes (figure 5, B) et les champignons, ce qui a pour conséquence un déchaussement des grains de la roche et parfois une desquamation à plus grande échelle. L'infiltration de l'eau par capillarité depuis des zones humides est aussi à l'origine de la détérioration de la roche. On notera que cette colonisation s'est développée sur les pierres de tuffeau jaune. Les pierres de tuffeau blanc présentent parfois, en surface, une teinte rosâtre consécutive au développement de bactéries photosynthétiques, lesquelles sont à leur tour consommées par des champignons.

## Décompte, identification et usages des pierres

La confrontation des faciès, des examens de caractérisation, du décompte des pierres *in situ* et des informations livrées par le compte de 1495-1496 permettent d'identifier les pierres et les usages auxquels elles sont dévolues (tableau 1)<sup>12</sup>.

## 4. MISE EN ŒUVRE

### Appareil

L'appareil de pierres de taille mises en œuvre sur la tour des Minimes est homogène, à l'exception des assises sommitales mesurées (62 et 63). Les mesures n'ont pu être réalisées sur le parement extérieur du mur d'enveloppe, mais l'échantillonnage réalisé sur les maçonneries intérieures est néanmoins significatif. La distribution des mesures des longueurs est compatible avec une distribution normale. Pour l'ensemble des assises, la valeur moyenne (47 cm) est élevée pour de la pierre de taille en tuffeau à l'époque médiévale, mais des dimensions voisines se rencontrent néanmoins sur

12. Le nombre de pierres mises en œuvre dans la tour des Minimes en 1495-1496 est calculé sur la base de 40 travées d'ogives mise en œuvre au cours de cette période, entre la 1<sup>re</sup> et la 47<sup>e</sup> assises intérieures.

Décompte issu du compte de construction 1495-1496	Provenance de la pierre	Décompte et observations <i>in situ</i> pour la campagne de 1495-1496
19 clefs de voûte 63 clefs de voûte = <b>76 clefs</b>	Les Terriz (1 <sup>er</sup> rôle) Saint-Aignan	<b>58 clefs</b> dans la tour y compris la partie restaurée. ≈ <b>40 clefs</b> posées en 1495-1496 Les clefs du 1 <sup>er</sup> rôle (Les Terriz) ne sont probablement pas pour la tour des Minimes.
= <b>30870 « pierres pendans »</b>	Bourré	Les pierres « pendans » sont employées au niveau des arrière-vous-sures de baies et dans les voûtains des voûtes d'ogives. ≈ <b>11 000 pierres</b> posées en 1495-1496.
336 pierres pour ogives 1 106 pierres pour ogives 18 pierres pour ogives = <b>1 460 pierres pour ogives</b>	Les Terriz Saint-Aignan Belleruche <sup>a</sup>	Chaque branche d'ogive est constituée de 4 pierres, chaque arc formeret et chaque arc doubleau de 9 pierres. ≈ <b>1 360 pierres</b> posées en 1495-1496, sans distinction possible entre Les Terriz et Saint-Aignan. Les arcs formerets et doubleaux sont manifestement entendus comme des ogives dans le compte.
3 pierres pour doubleaux 36,5 pierres pour doubleaux 124 pierres pour doubleaux = <b>163,5 pierres</b>	Belleruche Saint-Aignan Les Terriz	Il semble que la dénomination « doubleaux » ne concerne pas la tour des Minimes.
11 corbeaux 22 corbeaux = <b>33 corbeaux</b>	Saint-Aignan La Ronde	≈ <b>84 culots</b> dans la même pierre que les nervures (très probablement Saint-Aignan ou Les Terriz), mais la commande n'apparaît que très partiellement dans le compte de 1495-1496. Les achats ont pu être anticipés l'année précédente.
10 pierres pour « clervoyes » 5 pierres pour « clervoyes » 213 « blotz » pour « clervoyes » 31 pierres pour « clervoyes » = <b>259 pierres pour « clervoyes »</b>	Les Terriz Saint-Aignan Saint-Aignan Belleruche	Dans le noyau, les arcs des baies comptent chacun 5 claveaux et, à l'extérieur, 4 claveaux. ≈ <b>194 claveaux</b> posés en 1495-1496, sans distinction possible entre Les Terriz et Saint-Aignan. Belleruche ne semble pas destinée à la tour.
176 pierres « parpaings » 428 pierres « parpaings » 35 pierres « parpaings » = 639 pierres « parpaings »	Les Terriz Saint-Aignan Belleruche	Les « parpaings » n'ont pas pu être identifiés.
75 « quartiers » 8 897 « quartiers » 8 692 « quartiers » 237 « quartiers » 400 « quartiers » 11 401 « quartiers » 55 « quartiers » 337 « grands » quartiers 12 « grands » quartiers 4 309 « quartiers » 17 « quartiers » = <b>34 432 « quartiers », dont 345 grands</b>	Les caves Lussault Malvau Limeray Les Terriz Bourré Saumur Saumur La Ronde Saint-Aignan Belleruche	Les assises extérieures comptent en moyenne 82 pierres en tuffeau jaune ≈ <b>4 850 « quartiers »</b> posés en 1495-1496 à l'extérieur, soit un quart de ce que livrent les carrières de Lussault et Malvau <sup>b</sup> . Limeray et Les Caves ne peuvent être identifiés. Les assises de l'intérieur du noyau comptent en moyenne 30 pierres ≈ <b>1 410 « quartiers »</b> pour le noyau en tuffeau jaune. Les assises de l'extérieur du noyau comptent en moyenne 38 pierres ≈ <b>2 470 « quartiers »</b> en tuffeau blanc et jaune. ≈ <b>5 000 « quartiers »</b> pour le mur intérieur de la rampe en tuffeau blanc ou jaune. Total : ≈ <b>13 730 « quartiers »</b> posés en 1495-1496 <sup>c</sup> .
16 grands « blotz » 37 blotz 12 grands « blotz » 1 167 « blotz » 23,5 « blotz » = <b>1 255,5 « blotz » dont 28 grands</b>	Limeray Les Terriz Les Terriz Saint-Aignan Belleruche	Dans le mur extérieur de la rampe, chaque piédroit de baie emploie 9 pierres et chaque piédroit d'ébrasement de baie, 16 pierres. Dans le noyau, chaque piédroit de baie en emploie 10 pierres. ≈ <b>1 150 « blotz »</b> posés en 1495-1496. Tous les « blotz » de la tour sont en tuffeau blanc. Limeray n'a pas pu être identifié.
17 « demi blotz » 10 « demi blotz » = <b>27 « demi blotz »</b>	Saint-Aignan Belleruche	Les « demi-blotz » n'ont pas pu être identifiés.

a. On notera que quelques rares pierres d'ogives ou de formeret ont rosi. Il semble que ce soit la pierre de Belleruche qui présente cette altération microbienne.

b. À l'intérieur de la rampe, certaines pierres en tuffeau jaune verdissent. Il semble que ce soient celle du Bas-Lussault ou de Malvau exposés à l'humidité.

c. Bourré livre près d'un tiers des « quartiers ». Emploi de « quartiers » blancs très similaires aux pierres de piédroits d'ébrasement. Saint-Aignan, Les Terriz et Bourré ont donc le même faciès macroscopique (figure 2).

Tableau 1 : Décompte des pierres citées par le compte et *in situ*, dans la tour des Minimes.

Table 1: Count of the stones quoted by the account and *in situ*, in the tower of the Minimes.

plusieurs sites de la fin du Moyen Âge, ainsi que de la première moitié du xv<sup>e</sup> siècle (Prigent, 2011). On peut ainsi citer l'aile orientale de l'abbaye de Fontevraud (c. 1540-1545), le logis Barrault à Angers (1486-1496), la tour centrale de la façade occidentale de la cathédrale Saint-Maurice d'Angers (c. 1540). La dispersion des valeurs ( $s = 13$  cm) est particulièrement élevée, de même que pour les autres exemples cités. La comparaison entre les assises du bas de la tour et les assises supérieures ne montre pas de différence statistiquement significative, tant pour les hauteurs que les longueurs, du moins jusqu'à l'assise 61 (figure 6).

La répartition des valeurs de hauteurs offre un net aspect polymodal (figure 7) traduisant la présence de véritables modules de hauteur, phénomène ordinaire en Val de Loire depuis les débuts du moyen appareil de pierres de taille en tuffeau. L'originalité de la tour des Minimes est de présenter neuf ensembles, d'importance variable, les modules les plus grands ou les plus petits étant les moins bien représentés, ce qui est habituel dans les distributions médiévales observées; en revanche, environ six pierres sur dix appartiennent aux modules H4, H5 et H6 (tableau 2). Les moyennes des différents modules sont séparées par environ 2,5 cm, avec néanmoins une dispersion élevée au sein de chaque ensemble (environ 0,7 cm); il n'y a pas, cependant, utilisation de signes lapidaires caractérisant les modules, comme on le rencontre fréquemment sur les édifices du Val de Loire à partir du xiii<sup>e</sup> siècle. La comparaison entre le mur extérieur du noyau<sup>13</sup>, essentiellement monté en tuffeau de couleur blanchâtre (sans doute de plusieurs provenances) et le mur enveloppe, comportant à la fois du tuffeau blanc et du tuffeau jaune, ne montre pas de différence significative dans les valeurs de modules de hauteur, conduisant sur ce chantier comme d'autres à la proposition d'une taille menée sur place et non en carrière. Il ne semble pas qu'il existe non plus de changement significatif entre la partie inférieure et supérieure de la tour; comme pour les longueurs, l'ensemble apparaît d'une grande homogénéité. Quand il est lisible, le dressage apparaît uniquement réalisé à l'aide du marteau taillant brettelé, plusieurs types de brettures, aux dents plus ou moins larges, étant utilisées (figure 8).

Si les dimensions des quartiers de pierre ne sont pas mentionnées pour la construction de la tour elle-même, l'acte de réception de pierres du 14 janvier 1503 indique une longueur de 2 pieds pour les « quartiers » provenant de Bourré et de 2,5 pieds pour ceux extraits à Saint-Aignan (Gaugain, 2014 : 170)<sup>14</sup>. En réalité, ces dimensions appa-

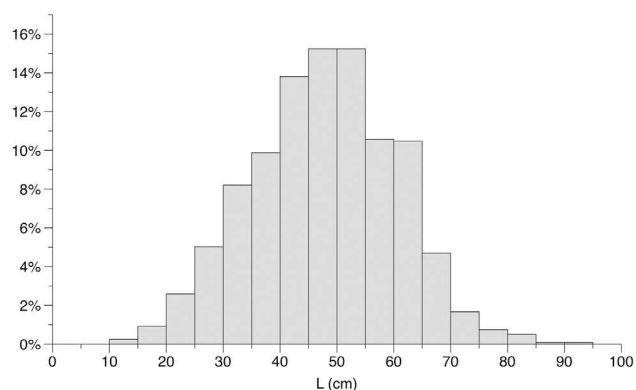


Figure 6 : Histogramme de répartition des valeurs de longueurs (assises 1 à 61, n = 1205) (© D. Prigent).

Figure 6: Histogram of the distribution of lengths (foundation 1 to 61, n = 1205) (© D. Prigent).

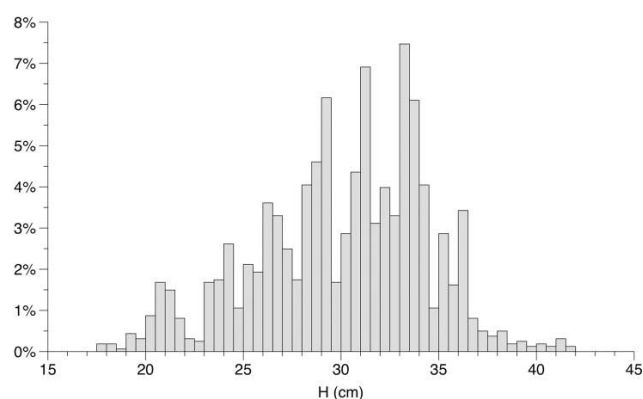


Figure 7 : Histogramme de répartition des valeurs de hauteurs (assises 1 à 61, n = 1619) (© D. Prigent).

Figure 7: Histogram of the distribution of heights (foundation 1 to 61, n = 1619) (© D. Prigent).



Figure 8 : Exemple de dressage au marteau brettelé. Le badigeon des joints est particulièrement lisible (© L. Gaugain).

Figure 8: Example of a Toothed axe dressing. The joining whitewash is easy to identify (© L. Gaugain).

13. Les analyses pétrographiques réalisées sur le mur intérieur du noyau ont conclu à l'emploi d'un tuffeau dont la composition est assimilable à celle d'un tuffeau jaune, en dépit de sa couleur blanchâtre.

14. BnF, ms.fr. 26108, f° 417.

Tour des Minimés, mur enveloppe et noyau					
	n	x		s	
L	1205	47,6	cm	12,6	cm
H	1619	29,9	cm	4,6	cm
H1		20,9	cm	0,5	cm
H2		23,7	cm	0,6	cm
H3		26,4	cm	1,0	cm
H4		28,8	cm	0,5	cm
H5		31,1	cm	0,8	cm
H6		33,4	cm	0,5	cm
H7		35,7	cm	0,7	cm
H8		38,1	cm	0,8	cm
H9		40,7	cm	0,7	cm
ejl	216	1,7	cm	0,5	cm
ejm	210	1,4	cm	0,4	cm
ejm/ejl		0,83			

Tableau 2 : Répartition des modules de hauteurs (L : longueurs, H : hauteurs; ejl : épaisseur des joints de lit; ejm : épaisseur des joints montants).

Table 2: Distribution of the modules of heights (L: length, H: height, ejl: thickness of the horizontal joints; ejm: thickness of the vertical joints).

remment précises fournies par les sources textuelles ne correspondent pas à ce que l'on peut observer sur l'ensemble des élévations des édifices, tant civils que religieux, pour lesquels les mesures de longueurs suivent ordinairement une distribution normale ou proche de celle-ci, et celles des hauteurs étant systématiquement distribuées en véritables modules. De plus, les valeurs moyennes de longueurs des différentes assises ne peuvent pas être statistiquement différenciées de la moyenne générale. Il est tentant de relier ces observations aux sources documentaires qui indiquent fréquemment à la fin du Moyen Âge et à l'époque moderne, l'achat de blocs provenant de la carrière par lots de cent, ce qui est bien le cas dans le compte de construction de 1495-1496<sup>15</sup>. Il est ainsi vraisemblable que c'est le mètre de chaque centaine de blocs qui était pris en compte, ce qui permettait une meilleure rationalisation de la production en carrière. En ce qui concerne les « blotz » – qui, rappelons-le, sont des pierres d'angle montrant deux faces taillées –, le même acte de réception de 1503 stipule qu'ils doivent avoir 14 pouces de haut, soit environ 37,9 cm. Si cette valeur ne correspond pas non plus à la hauteur moyenne des « blotz » livrés en 1495-1496, qui est voisine

15. *Ibid.*

de 30 cm, elle montre, conformément à ce que l'on observe *in situ*, que les « blotz » sont plutôt des pierres de grande taille, dont les hauteurs appartiennent préférentiellement au module H6 (environ un tiers) et sont de moindre importance pour les trois premiers modules.

Les joints de lit (ejl), remplis de mortiers assez grossiers sont plus gras<sup>16</sup> que les joints montants (ejm) et les mesures réalisées traduisent une assez faible dispersion des épaisseurs.

Le rythme et la rapidité du chantier se démontrent à travers (Gaugain, 2014 : 183) : le nombre de journée d'hommes qui augmentent en hiver pour compenser le moindre nombre d'heures de jour<sup>17</sup>, les achats de chandelles pour travailler de nuit<sup>18</sup>, l'achat de bois pour chauffer les pierres et le fait que le chantier ne s'arrête pas au cœur de l'hiver<sup>19</sup>, la variété des lieux d'extraction, mais également à travers la mise en œuvre des parements intérieurs qui ne suit pas véritablement l'ordonnance des assises réglées puisque bon nombre se dédouble dans les pans de murs joignant les ébrasements des baies (figure 3). On constate en effet que ce sont les baies qui ont régi l'organisation du chantier. Les piédroits des ébrasements de baies, les « blotz », sont mis en œuvre préalablement aux pans de murs élevés en simples « quartiers » et ce sont eux qui dictent le rythme de l'élévation. Les quartiers comme les « blotz » répondent aux mêmes modules de hauteur, taillés en série et à l'avance, les « blotz » étant toutefois toujours de grande taille. Les dédoublements d'assises et les décrochements que montrent certains « quartiers » doivent s'expliquer par l'organisation du chantier et les dispositions particulières de l'ouvrage. Les maçons ont dû travailler sur l'épaisseur des murs (3,20 m) et sur l'extrados des voûtes de la rampe qui présente une pente de 19°. Entre deux embrasures de baies construites, ils maçonneront les pans de murs selon des assises horizontales pseudo-réglées. Ils partent donc des pierres d'angle d'une baie, les « blotz », qui peuvent imposer des hauteurs d'assises réglées plus éle-

16. On qualifie de gras des joints larges.

17. Pour les mois de septembre, octobre et novembre, le chantier compte 157 maçons; contre 171 en janvier, février et mars; 134 en avril, mai et juin; et 115 en juillet, août et septembre.

18. Archives Nationales, série KK, *Compte de construction du château d'Amboise (1495-1496)*, f° 89 r<sup>o</sup>-v<sup>o</sup> : « A lui, 88 livres de chandelles par lui baillé au temps dessusdit pour servir aux maçons, menuisiers et autre ouvriers qui ont besoigné de nuit a ladite chandelle pour le fait desdits edifices aupris de 14 d. la livre a esté payé par credit commis par vertu dudit roolle comme par sadite quittance appert la somme de 152 s. 8 d. » Le paragraphe suivant concerne l'achat de « 256 livres autre et meme chandelle [...] pour servir comme dessus ».

19. *Ibid.*, f° 168 r<sup>o</sup> : « A Jehan Bernard, pour huit rortees de boys a compte par lui baillé et livré au mois de decembre pour chauffer et dejeuner lesdits pris pendans dont les voultres ont este faictes aupris de sept sols la rotee a esté payé par credit commis par vertu dudit roolle comme par sa quittance cy rendue appert la somme de 56 s. t. »

vées que la moyenne. Puisqu'on ne dispose pas de suffisamment de grands modules, entre deux baies, on se contente de lier, à la baie la plus basse d'abord ou à la baie la plus haute ensuite, au moins un « quartier » de hauteur équivalente à un « blotz » ; puis l'on maçonne le reste du mur avec des modules de moindre valeur. Pour assurer les raccords entre les modules, il est nécessaire de ménager encoches et décrochements dans les « quartiers » – en grande partie en tuffeau jaune –, ce qui suppose le recours à un appareilleur. On notera à ce propos, la présence à Amboise, parmi les trois maître-maçons, de Louis Amangeart qui œuvre également à Chambord en tant qu'appareilleur en 1522 (Gaugain, 2014a : 32). Enfin, du point de vue de la mise en œuvre, il semble que les baies jouent un rôle important dans la stabilité de la tour. Bien loin d'affaiblir le mur, leur nombre élevé impose la présence d'arcs et de parements d'ébrasement qui liaisonnent les parements intérieur et extérieur du mur de rampe. Les piédroits d'ébrasement emploient ainsi des « blotz », toujours en tuffeau blanc, taillées sur deux faces qui jouent le rôle de boutisses. La stéréotomie complexe de ces pierres justifie également la présence d'un appareilleur.

### Mortiers : distribution granulométrique et teneur en chaux

Les mortiers de la tour présentent sur le terrain un aspect homogène (tableau 3) ; en revanche, l'analyse de la distribution granulométrique de l'agrégat, associée à la mesure des teneurs en solubles, démontre l'existence d'approvisionnements variés<sup>20</sup>. Trente et un échantillons ont été prélevés sur la hauteur de la tour, jusqu'à l'assise 53 ; leur répartition, guidée par la volonté d'obtenir un écartement régulier, a cependant été contrainte par la nécessité de réaliser des prélèvements les plus discrets possibles, à l'intérieur d'un bâtiment ouvert à la visite. Les analyses granulométriques des agrégats ont été réalisées sur la fraction insoluble des échantillons supérieure à 50 µm (sables et graviers), après attaque à l'acide chlorhydrique dilué puis séparation par un premier tamisage à l'eau de la fraction fine (inférieure à 50 µm) composée de silts et d'argile (Prigent, 2009 : 139-144).

La teneur en solubles, qui correspondent uniquement ici à la chaux, est très variable en fonction des types de liants déterminés (figure 10) (Büttner, Prigent, 2007). Elle varie de 19 % (assise 37, noyau) à 33 % (assises 30, mur enveloppe

Type	Sol	FF	G	SG	SF	x	S
A	21,5	2,6	9,2	70,0	20,8	0,73	1,26
B	23,4	1,4	19,5	67,1	13,3	0,23	1,40
C	39,8	3,3	9,0	67,4	23,6	0,82	1,38
D	26,9	1,9	5,9	83,2	10,9	0,40	1,05
E	27,8	1,4	8,2	86,3	5,5	0,24	0,97
F	25,9	2,8	14,5	65,6	19,9	0,54	1,34
G	29,1	2,5	9,5	80,9	9,6	0,36	1,17
H	22,2	1,2	21,1	73,5	5,5	-0,06	1,19
I	33,1	2,2	7,1	80,6	12,4	0,42	1,16
J	26,5	1,5	8,1	79,1	12,9	0,57	1,13
K	19,0	1,3	33,4	61,8	4,8	-0,45	1,37
LO	28,3	1,9	7,4	82,8	9,8	0,41	1,07
M	22,9	2,2	5,3	72,8	21,9	1,00	1,07
N	28,2	4,4	13,9	74,2	12,0	0,33	1,33
P	20,5	1,3	24,7	69,8	5,6	0,12	1,22
Q	26,5	1,6	13,7	77,7	8,7	0,18	1,20
R	22,2	1,0	9,4	83,9	6,7	0,28	1,03

Tableau 3 : Les différents types de mortiers, de bas (A) en haut (R) de la tour. Les pourcentages des solubles (sol.) et de la fraction fine (FF) sont donnés par rapport à la masse totale des mortiers ; ceux des graviers (G), des sables moyens et grossiers (SG) et des sables fins (SF), par rapport à la masse des insolubles. Moyennes (x) et écarts-types (s), exprimés en unités F, sont calculés par la méthode des moments.

*Table 3: The various types of mortars of the tower. The percentages of soluble (sol.) and the fine fraction (FF) are given with regard to the total mass of mortars; those of the gravels (G), average and unrefined sands (SG) and fine sands (SF), with regard to the mass of the insoluble. Average and standard deviations are calculated by the method of moments.*

et 33, noyau) et même 40 % (assises 7 à 10 du noyau), les autres valeurs se répartissant entre 22 et 28 %. Le pourcentage de fraction fine est négligeable, comparable à celui observé sur différents sites s'élevant à proximité du fleuve (tour-maitresse de Langeais (Indre-et-Loire), châteaux de Montsoreau, Saumur, Trèves, Ponts-de-Cé (Maine-et-Loire) pour les mortiers provenant d'alluvions ligériennes, et varie de 1 % à 4 % (moyenne 2 %).

L'agrégat (sable et graviers) présente une importance variable des graviers ( $d > 2$  mm) ; néanmoins seuls les petits graviers sont représentés, quel que soit le groupe considéré ; les éléments de diamètre supérieur à 5 mm sont en effet peu présents (figure 9 et Tableau 3). On ne retrouve pas ici les distributions de sédiments grossiers qui caractérisent une partie du matériel alluvial ligérien vers Amboise (Babonaux, 1970 : 49-88 et Brossé, 1982 : 62-64), à la suite d'un choix

20. Bien d'autres approches sont utilisées (Palazzo-Bertholon, 1999 ; Baronio, Binda, 1997 ; Coutelas *et al.*, 2009 : 123-153 ; Elsen *et al.*, 2011 : 123-153 ; Feneuille *et al.*, 2016) ; l'analyse de la distribution granulométrique, robuste, reproductible et peu onéreuse, suit les normes classiques (Fournier *et al.*, 2012).

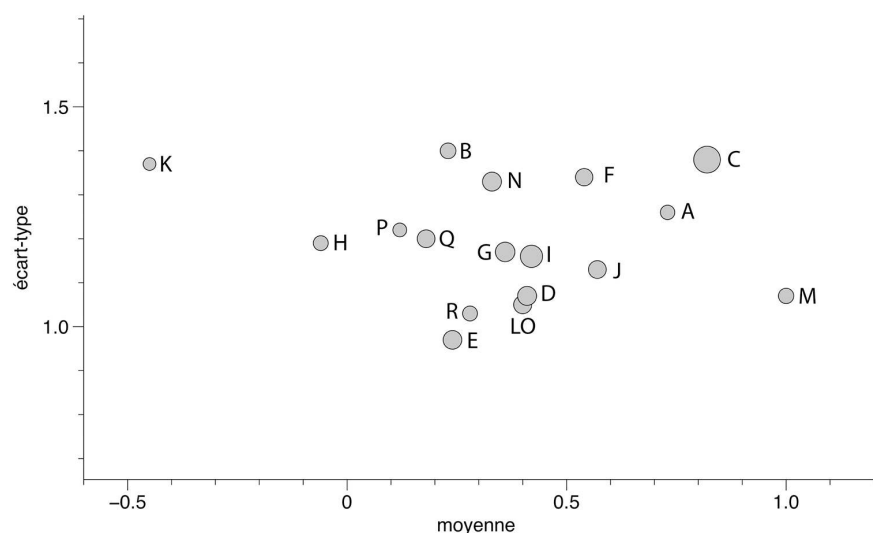
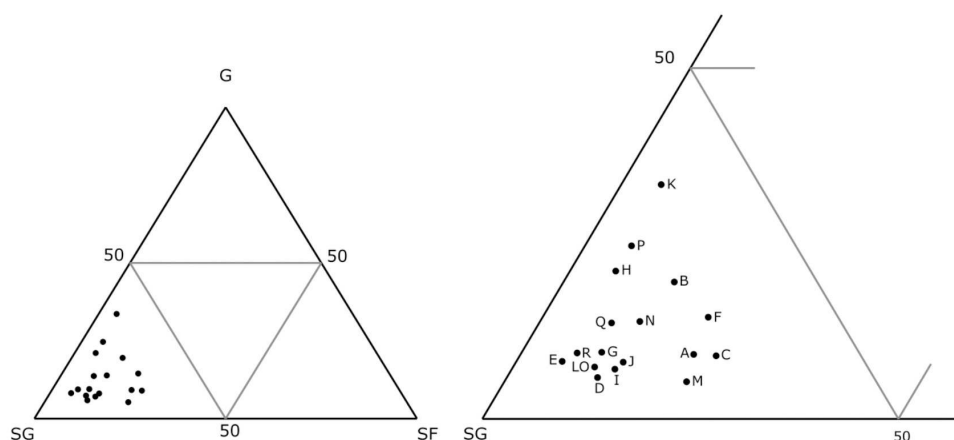


Figure 9 : Répartition des moyennes et écart-types exprimés en unités  $F$  ( $F = -\log_2 d$ ,  $d$  étant exprimé en mm) des différents types d'agrégats; le diamètre des cercles croît avec le pourcentage de solubles (© D. Prigent).

Figure 9: Distribution of the average and standard deviation of the different types of aggregates (phi units  $F = -\log_2 d$ ,  $d$  grain diameter in mm); the diameter of the circles sizes up according to the percentage of soluble materials (© D. Prigent).

Figure 10 : Répartition des différents types d'agrégats déterminés en fonction de l'importance des graviers (G,  $d > 2$  mm), sables moyens et grossiers (SG) et sables fins (SF,  $d < 0,315$  mm) (© D. Prigent).

Figure 10: Distribution of the different types of aggregates according to the amount of gravel (G,  $d > 2$  mm), coarse and middle sized sand (SG) and fine sand (SF,  $d < 0,315$  mm) (© D. Prigent).



dans l'approvisionnement du chantier (grève ou buttes plus que chenaux?) ou d'un criblage préliminaire.

L'analyse de l'agrégat montre que les prélèvements se répartissent en 17 types distincts, dont neuf ne comprennent qu'un seul échantillon. Les comptes de 1495-1496 semblent ne concerner que les 47 premières assises (*cf. supra*), mais un même mortier continue toutefois à être employé entre l'assise 50 et l'assise 52 pour le mur enveloppe et au minimum jusqu'à l'assise 51 pour le noyau, ce qui tend à prouver la continuité du chantier au-delà de l'automne 1496.

L'hypothèse initiale concernant l'avancée de la construction considérait que les types de liants se succédaient verticalement de manière régulière sur l'ensemble de la tour, l'homogénéité régnant à un même niveau entre le noyau central et l'enveloppe externe. L'évolution de l'alimentation du chantier apparaît en réalité plus complexe (tableaux 3 et 4). Certains types d'agrégats se rencontrent au même niveau sur plusieurs assises; c'est le cas pour le type C. D'autres apparaissent peu utilisés sur la tour mais peuvent

avoir alimenté des chantiers distincts sur le site; le type E est ainsi circonscrit sur une ou deux assises du noyau. Pour un même niveau le mortier peut être distinct entre la partie centrale et l'enveloppe; c'est notamment le cas pour l'assise 37 (types K et L). Ces conclusions corroborent le fait que le chantier du château ait été régi en plusieurs pôles, peut-être tenus par chacun des maîtres-maçons mentionnés par le livre de compte (Gaugain, 2014 : 182)<sup>21</sup>. Ainsi, l'atelier du mortier demeura sur le promontoire, alors même que la loge des maçons de la tour des Minimes se situait au pied de la tour, au Petit Fort, alimentait les ouvriers grâce à des gouttières descendant le long du promontoire<sup>22</sup>. Cette

21. Les trois maîtres-maçons, Colin Biart, Guillaume Senault et Louis Amangeart reçoivent 6 sols 3 deniers par jour. Un quatrième homme, Pierre Bridonneau, rétribué à la même hauteur, mais qualifié de simple maçon, a pu tenir un 4<sup>e</sup> pôle d'activité du chantier.

22. Archives Nationales, série KK, Compte de construction du château d'Amboise (1495-1496), f° 78 r° : « A Pierre Beauhardi pour cinq toise de gouttières par lui bailles au temps dessusdit pour servir aux maçons a faire couler le mortier du hault en bas au pris de 3 s. la toise a esté payé par credit

Type de mortier	Numéro d'assise
A	A1N
B	A 2 à 4
C	A7 à 10
D	A9N
E	A10N
F	A12N
G	A10 à 24
H	A22 à 29
I	A30 à 33N
J	A33E
K	A37N
LO	A37E à 40 à 48
M	A42
N	A44E
P	A47 à 50
Q	A46 à 51
R	A53E

Tableau 4 : Correspondance entre les types de mortiers et les assises où ils ont été prélevés.

*Table 4: Correspondance between the types of mortars and the number the stoneline where they were sampled.*

organisation implique que le grand volume de mortier produit par les manœuvres était réparti à mesure des besoins, certaines parties avançant plus rapidement que d'autres ou faisant un usage plus important de mortier (Gaugain, 2014 : 174-175)<sup>23</sup>. Une même cuve gâchée devait donc être destinée à plusieurs ouvrages et puisque les manœuvres devaient doser approximativement leur mélange, les différences transparaissent dans l'analyse du mortier.

Il n'est pas possible ici de déterminer le volume d'agrégat mis en œuvre, sinon comme simple ordre de grandeur. L'entreprise chargée de la restauration a estimé à environ 3 490 m<sup>3</sup> le volume total de maçonnerie de la tour, dont

commis par vertu dudit roolle comme par sa quittance cy rendue appert la somme de 20 s. » On notera que le promontoire mesure environ 22 m de haut. F<sup>o</sup> 147 r<sup>o</sup> : « A lui pour soixante quinze toyses de chevrons par lui baylez comme dessus pour employer a faire une loge ou appentiz au Petit Fort pres la tour que on y fait de present pour servir a faire besongner les maçons cant il fait mauvais temps ou autrement aupris de 7 d. 0 v t. la toise a esté payé par cedit commis par vertu dudit roolle comme par sa quittance rendue sur la partie precedent servant cy appert la somme de 46 s. 10 0 b. t. »

23. Les parties sculptées devaient avancer plus lentement, alors que celles en brique utilisant jusqu'à sept fois plus de mortier devaient progresser rapidement.

2 800 m<sup>3</sup> serait composé de pierres de taille<sup>24</sup> ; on peut ainsi évaluer grossièrement le volume d'agrégat à 700 m<sup>3</sup>, ce qui correspond, pour la majorité des types à plusieurs dizaines de m<sup>3</sup> de sables et graviers.

## 5. LA CHAUX DES MORTIERS ET DES BADIGEONS : NATURE ET FONCTION

### Aspects macro et microscopiques

Du point de vue macroscopique, la phase liante des échantillons de mortiers a une couleur très claire, blanc-crème, qui contraste avec l'aspect foncé (gris, brun, noirâtre) des grains qu'elle englobe. La fine couche de badigeon qui recouvre ces mortiers au niveau des joints a une apparence encore bien plus blanche.

Des lames minces ont été réalisées à partir des échantillons référencés E, 27, 29, 30, et 31. Elles ont volontairement été légèrement surépaissies (40 à 50 µm) pour diminuer le risque de biseau ou d'arrachage du badigeon lorsqu'il était présent à la surface du mortier. Cela induit cependant une petite modification des teintes de polarisation des minéraux ainsi qu'une modification de l'aspect des zones finement cristallisées (micrite par exemple).

L'observation des lames minces (microscope pétrographique, OLYMPUS BX41, lumière transmise polarisée /analysée) montre que la phase liante des mortiers est constituée de calcite (carbonatation de la chaux) et que sa microstructure, régulière, est d'une très grande finesse. En effet, elle correspond le plus souvent à une phase très compacte à l'aspect lisse, d'aspect « porcelané », et ne prend qu'occasionnellement une apparence légèrement granuleuse (microstructure plus ou moins micritique). La structure de la phase liante du mortier devient cependant plus grossière (figure 11) dès lors qu'elle correspond à un nodule de chaux pure (liant non dispersé dans le mortier au moment du gâchage). Les mortiers observés comportent naturellement quelques pores millimétriques dont la proportion a pu être estimée à environ 5 à 7 % du volume total du mélange. Ces premiers constats laissent à penser que la chaux utilisée était de bonne qualité, et elle a probablement été broyée très finement pour augmenter sa réactivité.

L'observation de la couche de badigeon montre qu'elle est également constituée de calcite. Sa microstructure (aspect

24. Données aimablement fournies par Gille Delaage et Frédéric Bourreau dans le cadre d'un projet de restitution du chantier virtuel monté par la Fondation Saint-Louis (suivi scientifique Lucie Gaugain). Le suivi des restaurations devrait permettre d'affiner ces chiffres, surtout celui de l'estimation du volume de pierres de taille.

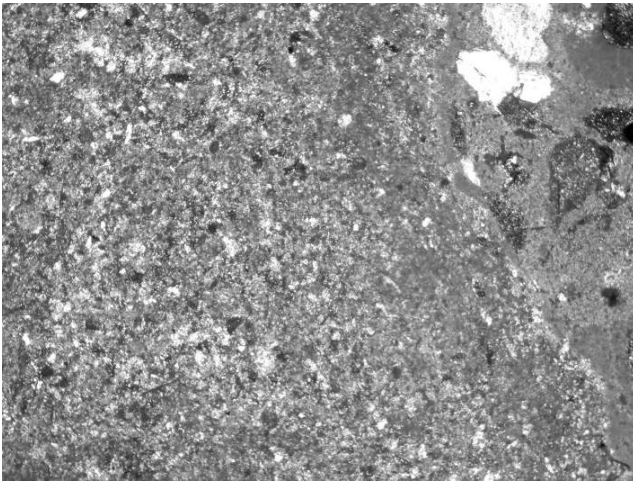


Figure 11 : (Voir planche couleur VI) Aspects du liant d'un nodule de chaux et du mortier sur la droite (échantillon n° 29, LPPA, champ : 3,2 × 2,9 mm) (© J.-M. Mechling).

Figure 11: (See colour plate VI) Aspect of the binder of a lime nodule and mortar on the right (sample n° 29, LPPA, champ: 3,2×2,9 mm) (© J.-M. Mechling).

micritique) est plus grossière que celle de la pâte des mortiers sous-jacents et elle s'apparente de ce fait à celle des nodules de chaux pure disséminés dans les mortiers (figure 12). Le badigeon comporte environ 10 % de quartz anguleux très fins (taille moyenne  $\approx 30$  à  $40 \mu\text{m}$ ) ainsi que des micas blancs (muscovite) et ce qui semble être de la glauconite (environ 5 % à eux deux). Ces minéraux silicatés pourraient être caractéristiques de la chaux elle-même (cf. *infra*). Le badigeon – plus riche en silice, nous y reviendrons – se matérialise par une couche de faible épaisseur, comprise entre 0,5 et 1,5 mm (à l'exclusion de possibles débords sur le parement comme dans le cas de l'échantillon E), qui comble les éventuelles petites irrégularités de surface du mortier (échantillons n° 30 et 31). L'interface mortier-badigeon est très nette et elle n'englobe pas de cristallisations particulières qui pourraient correspondre à la formation de calcin, par exemple. Le badigeon a donc probablement été appliqué peu de temps après la pose du mortier. Soulignons que lors du broyage des échantillons de mortiers, destinés à la granulométrie de l'agrégat (cf. *supra*), ont été retrouvés des poils de pincaux – semble-t-il de suidés – provenant de l'application du lait de chaux<sup>25</sup>.

Les observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) ont été réalisées avec un appareil FEI XL30 S-FEG® sur des échantillons préalablement métallisés au carbone. Les investigations menées sur divers fragments (A, B, et F)

25. Le lait de chaux s'obtient en mélangeant trois volumes d'eau à 1 volume de chaux grasse éteinte.

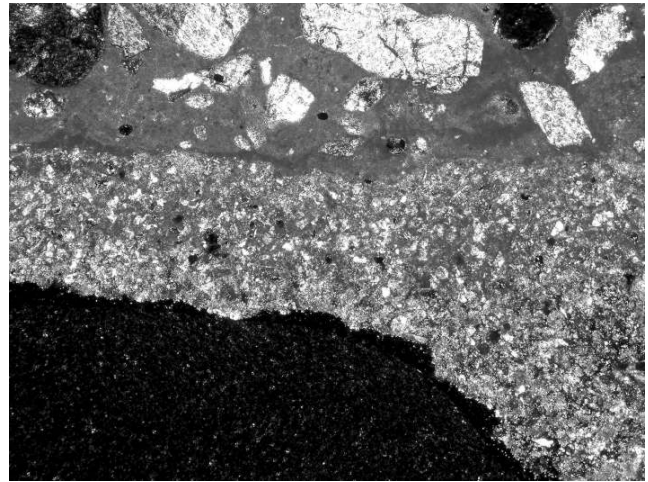


Figure 12 : (Voir planche couleur VI) Aspects du badigeon (bas) et du mortier en haut (échantillon E, LPPA, champ : 3,2 × 2,9 mm) (© J.-M. Mechling).

Figure 12: (See colour plate VI) Aspect of the whitewash (bottom) and of mortar (top) (sample E, LPPA, champ: 3,2×2,9 mm) (© J.-M. Mechling).

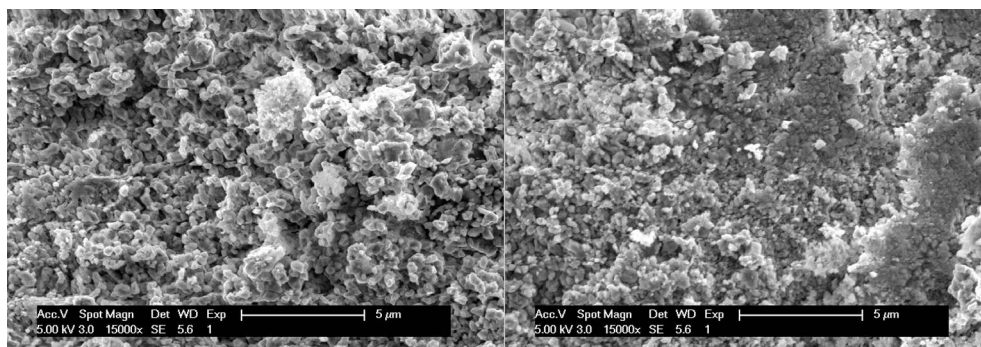
montrent des microstructures assez caractéristiques des chaux aériennes, c'est-à-dire l'imbrication de très fins rhomboédres ( $0,5$  à  $1 \mu\text{m}$ ) de calcite (figure 13). Des gels ou des structures caractéristiques des silicates calciques hydratés (CSH) n'ont pas pu être clairement repérés. D'autre part, contrairement à la différence d'aspect clairement établie en lames minces, entre la pâte du mortier et celle du badigeon, il n'a pas été constaté de différences flagrantes avec cette technique d'observation. Le passage de la phase liante du mortier à celle du badigeon semble être parfaitement continu et l'interface mortier-badigeon paraît inexistante. Ce constat suggère l'application d'une fine couche de badigeon à la surface des joints de mortiers, probablement peu de temps après leur mise en place. Il n'y a en effet pas de phénomène de laitance ou de carbonatation accrue à la surface du mortier qui se caractériserait vraisemblablement par une microstructure/porosité différente de celle du mortier ou du badigeon (différence de rapport eau/liant, obstruction des pores sous l'effet d'une plus forte cristallisation au contact de l'atmosphère, etc.). Ce travail réalisé dans des délais assez brefs pourrait correspondre dans le compte de 1495-1496 à la rétribution de bouzilleurs pour « joindre et bauchir les voultres<sup>26</sup> » qui durent également œuvrer à la finition des parements en masquant les joints. On soulignera qu'aucune différence entre un mortier de pose et un mortier de jointolement n'a pu être notée (Coutelas, 2009 : 105).

26. Cf. note 11.



Figure 13 : Aspects du liant du mortier (échantillon B) (© J.M. Mechling).

Figure 13: Aspects of the binder of the mortar (sample B) (© J.M. Mechling).



## Analyses chimiques et minéralogiques

Des analyses chimiques ont été menées avec le « spectromètre EDS » EDAX® (et son logiciel dédié) installé sur le MEB utilisé pour les observations de microstructure. Ce procédé donne des analyses semi-quantitatives sur des zones très ponctuelles. Mais elles ont ensuite été complétées par des analyses par fluorescence des rayons X, plus globales mais aussi plus précises. Au MEB, les plages de liants analysées tant sur les mortiers que sur les badigeons (échantillons A, B, et F) ont été choisies à l'écart de tout grain susceptible de fausser les résultats. Les zones de mesure étaient planes et avaient des tailles comprises entre 100×40 µm et 300×120 µm. Les résultats obtenus (exprimés en pourcentages atomiques, carbone non pris en compte) sont globalement très similaires d'un échantillon à l'autre. Le calcium est le cation majoritairement présent (environ 20 %). Associé à l'oxygène, et en respectant la stœchiométrie de la calcite (CaCO<sub>3</sub>), ils constituent donc près de 80 % des éléments détectés. Le silicium est exprimé dans des proportions nettement plus faibles (1 à 3 %). Il correspond au quartz (avec l'oxygène), mais associé à d'autres éléments comme l'aluminium et certains alcalins, il rentre dans la composition du mica blanc et de la glauconite. Du soufre, également repéré en très faible quantité, pourrait correspondre à des traces de gypse dans le mélange.

Pour affiner ces analyses, des investigations ont également été menées sur la phase liante d'un prélèvement de mortier (n° 47) et son badigeon (n° 48) par fluorescence des rayons X sur perle. Le mortier a subi un broyage modéré destiné à dissocier la fraction sableuse et le liant à analyser. Ce dernier passe en effet facilement à l'état de très fines particules et peut donc être récupéré grâce à un tamisage au tamis de 80 µm. Les 2 prélèvements de liants ont été broyés finement avant que de subir une perte au feu à 1 000 °C (PAF) durant 1 heure en vue des analyses. Le dispositif utilisé est un spectromètre à dispersion de longueur d'onde BRUKER® S4 Explorer et son logiciel SpectraPlus (Bruker®).

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau correspondant (tableau 5). Compte tenu des étalonnages du système de mesure, la précision des valeurs se situe aux environs de 0,3 %.

Ces résultats montrent que la phase liante extraite du mortier comporte environ 80 % de calcite (en combinant la quasi-totalité de la PAF avec 45 % de CaO). Les 20 % restants reviennent ensuite à des minéraux purement silicatés (quartz), des minéraux aluminosilicatés associés à K, Na, Ca, Mg ou Fe (feldspaths, micas, etc.), voire à la présence d'une très faible quantité de gypse (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Ces minéraux correspondent en grande partie à la phase sableuse du mortier (identifiée en lames minces) qui n'a pu être séparée au cours de la préparation de l'échantillon de liant. L'hypothèse de l'utilisation d'une chaux hydraulique, issue d'un calcaire initialement riche en argiles, n'est donc pas à privilégier. Des éléments souvent associés aux argiles tels que l'aluminium, le magnésium ou le potassium sont en outre représentés avec des teneurs assez faibles. Les résultats obtenus pour le badigeon concordent avec les précédents,

	Phase liante mortier (n° 47)	Enduit (n° 48)
Perte au Feu (1 000 °C)	35,3	31,1
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,1
MgO	0,5	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8	1,3
SiO <sub>2</sub>	12,9	26,1
SO <sub>3</sub>	0,9	2,6
K <sub>2</sub> O	0,6	0,5
CaO	46,7	37,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	0,5

Tableau 5 : Résultats (%) de Fluorescence des rayons X effectués sur le mortier (47) et l'enduit (48) prélevés dans les assises 47-48.  
Table 5: Results (%) of performed on the mortar (47) and the filler (48) taken in stoneline 47-48.

à quelques nuances près. La valeur de la perte au feu est légèrement trop forte pour n'être due qu'à la décarbonatation de la calcite. En effet, la valeur de 31,1 % devrait résulter d'une teneur en CaO de 39,6 %, contre 37,5 % réellement mesurée. La teneur en soufre est relativement marquée ( $\text{SO}_3 = 2,6 \%$ ) et on peut penser qu'il est associé à une partie du calcium pour former du gypse. Des proportions de l'ordre de 65 % de calcite et 2 à 3 % de gypse seraient compatibles avec les proportions d'oxydes détectés et la PAF mesurée. La teneur en silicium ( $\text{SiO}_2 = 26,1 \%$ ) est assez élevée mais coïncide parfaitement avec l'observation des très fins fragments de quartz et de micas, en lames minces. Les différences de pureté mises en évidence entre les liants des badigeons et ceux des mortiers pourraient traduire un changement de carrière d'extraction et donc un phasage du chantier ; ce que confirme le compte de 1495-1496 qui stipule bien que la finition des voûtes intervient au cours des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> rôles seulement.

Pour confirmer la minéralogie des liants, des analyses par diffraction des rayons X (DRX) ont été menées sur un fragment de badigeon détaché de l'échantillon E, le badigeon n° 48, et un fragment de mortier de l'échantillon 31. Comme précédemment, le liant a été séparé du mortier par broyage modéré et tamisage (cf. Fluorescence des RX). L'analyse des deux échantillons a été conduite sur poudre finement broyée (broyeur à anneaux), en utilisant un diffractomètre BRUKER® D8 Advance (source :  $\lambda\text{CuK}\alpha 1 = 1,54056 \text{ \AA}$ ) équipé d'un détecteur LYNXEYE (Bruker®). Le dépouillement des diffractogrammes a été effectué avec le logiciel EVA® (Bruker®). Le spectre obtenu sur la phase liante du mortier ne comporte que les raies de diffraction de la calcite et celles du quartz, nettement moins intenses (figure 14). Le spectre du badigeon E reprend ces mêmes raies, avec une intensité un peu plus forte pour le quartz (observé en lames minces) mais aussi quelques raies supplémentaires. Une raie mal définie centrée sur l'angle  $2\theta = 21,7^\circ$  pourrait être attribuée à de la tridymite mal cristallisée (phase haute température de la silice, éventuellement héritée de la cuisson de la chaux). En revanche, aucune raie ne correspond à la glauconite (conséquence de la déstabilisation de sa structure lors de la cuisson de la chaux vers 850-900 °C?). Enfin, les raies principales du gypse se détachent faiblement du bruit de fond, corrélant ainsi les traces de soufre détectées au MEB et en fluorescence X. L'analyse menée sur le badigeon n° 48 donne exactement le même diffractogramme, avec les raies du gypse un peu plus marquées.

Enfin, pour détecter et quantifier les phases hydratées (dont les CSH mal cristallisés) et les carbonates, des analyses thermo gravimétriques (ATG) et thermiques différentielle (ATD) ont été menées avec un appareil SETARAM®

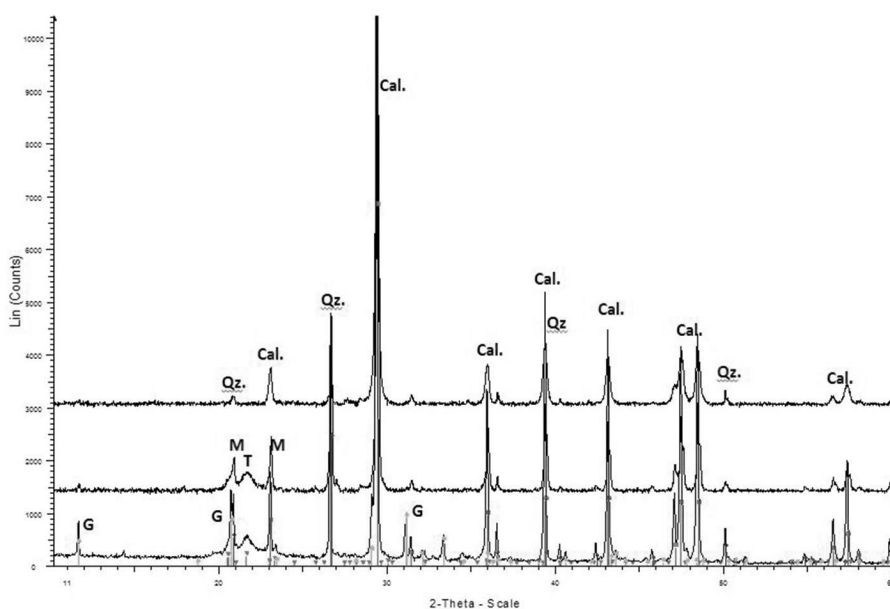
ATG92-16.18 équipée d'une canne DSC plateau. Les mesures ont été effectuées sur les poudres préparées pour les analyses par DRX, avec des prises d'essai d'environ 60 mg, dans un creuset en platine. La montée en température s'est faite à 10 °C/min entre 20 et 1 000 °C avec un balayage de l'échantillon sous azote. Les courbes<sup>27</sup> ATG des trois échantillons sont relativement similaires (figure 15 a et b), essentiellement dominées par la décarbonatation de la calcite qui entre 700 et 850 °C représente 75 à 85 % de la perte totale de masse enregistrée au cours des essais. Ces dernières, exprimées par rapport aux masses initiales des échantillons 31, E et 38 sont respectivement de 34, 28 et 25 % ce qui correspond globalement aux pertes au feu théoriques de la calcite (44 %), compte tenu des degrés de pureté. L'analyse chimique précédente a en effet indiqué des teneurs en carbonate de l'ordre de 80 % pour le mortier et 65 % pour le badigeon. En dehors de cette réaction, les pertes de masse enregistrées entre 20 et 700 °C sont très régulières sauf entre 115 et 150 °C. En effet, une perte de masse supplémentaire apparaît plus ou moins faiblement sur les trois échantillons. Elle est surtout mise en évidence par l'individualisation d'un petit pic endothermique au niveau du signal ATD. Cette perte de masse, exprimée en pourcentage relatif, est à peine supérieure à 1 % pour l'enduit n° 38 et se situe autour de 0,3 % pour les deux autres échantillons. Elle semble correspondre à la transformation du gypse en bassanite (120 °C) d'autant plus que l'intensité du signal ATD est bien corrélée par l'intensité des raies du gypse sur les diffractogrammes. On peut cependant remarquer que la transformation de la bassanite en anhydrite vers 210 °C n'est pas visible. Il n'est donc pas totalement exclu que ce signal repéré entre 115 et 150 °C soit aussi pour partie lié à la déshydratation d'une faible quantité de CSH.

Les analyses chimiques montrent donc que la chaux utilisée est assez clairement de type « aérienne » avec éventuellement une très faible composante « hydraulique », ce qui correspond à l'état des connaissances actuelles sur le mortier de chaux médiéval (Coutelas, 2009 : 17). Le gisement exploité est par conséquent un calcaire ou une craie faiblement argileux/se qui comporte des impuretés. Elles sont essentiellement constituées de quartz, muscovite, glauconite (ensuite partiellement déstabilisée lors de la cuisson de la chaux) et possiblement la présence de sulfate de calcium en très faible quantité. On remarquera enfin que certaines de ces analyses (Fluorescence et Diffraction X, ATG-ATD) tendent à montrer que les enduits semblent s'individualiser

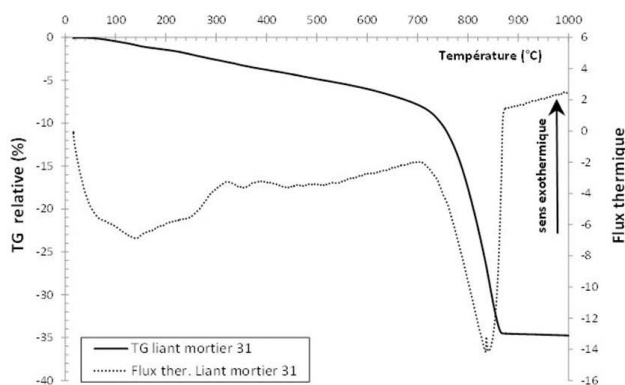
27. Les résultats repris dans la figure 15 ont été corrigés (soustraction des signaux ATG et ATD obtenus dans des conditions identiques avec le creuset vide).

Figure 14 : Diffractogrammes du liant du mortier (haut) et des badigeons E (milieu) et 48 (bas). G, gypse; M, muscovite, T, tridymite; Qz, quartz; Cal, calcite. (© J.M. Mechling).

Figure 14: Diffractograms of the binder of the mortar (top) and of the whitewash E (middle) and 48 (bottom). G, gypsum, M, muscovite, T, tridymite, Qz, quartz, Cal, calcite. (© J.M. Mechling).



**a** ATG - ATD du liant du mortier n°31



**b** ATG - ATD des badigeons E et n°48

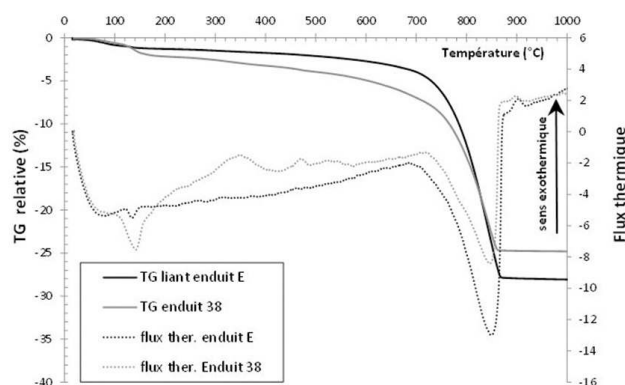


Figure 15 : ATG-ATD menées sur la phase liante du mortier n° 31 (a) et les badigeons E et 48 (b) Montée en température à 10 °C/min. sous flux d'azote. Déstabilisation 1-du gypse et/ou de CSH entre 115 et 150 °C; 2-de la calcite entre 700 et 850 °C. Le sens exothermique du flux thermique est dirigé vers le haut de la figure. (© J.M. Mechling).

Figure 15: TGA and DTA of the binding phase of the mortar n° 31 (a) and the whitewash E and 48 (b). Temperature increasing rate of 10°C/min. with a nitrogen flow. Temperature of destabilization 1-Gypsum and/or HSC about 115-150°C; 2-Calcite between 700 and 850°C. The exothermic direction of the heat flow is oriented toward the top of the figure. (© J.M. Mechling).

légèrement par rapport au liant des mortiers<sup>28</sup>. En effet, les badigeons étudiés (probablement des laits de chaux) seraient un peu plus riches en impuretés que la chaux employée pour la fabrication du mortier. Les origines des deux liants bien que relativement proches (minéralogiquement et stratigraphiquement parlant) pourraient donc provenir de deux carrières différentes.

<sup>28</sup>. Des analyses en plus grand nombre à l'échelle de bâtiment seraient toutefois nécessaires pour l'affirmer avec certitude.

## Approvisionnement en chaux

Un nodule de chaux a pu être observé en détail dans le mortier n° 29. Ce résidu de liant, non dispersé dans le mortier, est intéressant car les minéraux résiduels qu'il renferme sont supposés être représentatifs du gisement qui a été exploité pour la fabrication de la chaux. Dans le cas présent le nodule carbonaté comporte une faible proportion de quartz, muscovite, et probablement des grains de glauconite (partiellement altérés au cours du processus de cuisson de la

chaux?). On remarquera que ces mêmes minéraux peuvent également se retrouver dans la phase liante des mortiers et des badigeons, où ils peuvent aussi être associés à une quantité variable d'agrégats.

Les formations de Tuffeaux (Turonien) et de la Craie de Villedieu (Sénonien) sont susceptibles de correspondre à la définition de ce cortège minéralogique, mais il faut également intégrer le fait que la chaux, bien blanche, comporte peu d'oxydes de fer (tableau 4) et qu'elle est donc issue d'un faciès peu coloré. Le recoupement de ces données et de celles du livre de compte qui mentionne Rilly-sur-Loire (Loir-et-Cher) comme lieu d'approvisionnement en chaux<sup>29</sup>, permet de préciser le niveau géologique probablement exploité. En l'absence d'affleurement de Tuffeau blanc dans cette localité, la partie sommitale de la formation de la Craie de Villedieu paraît mieux correspondre aux caractéristiques de la chaux analysée. Le faciès typique de ce niveau est à la fois de couleur blanche et plus riche en carbonates que le restant de la formation, avec présence simultanée de quartz, glauconite et micas blancs. Le secteur de Mosnes-Vallières (Loir-et-Cher) situé à 2 km de Rilly montre des affleurements de Craie de Villedieu qui pourraient correspondre à l'ensemble de ces critères.

## 6. CONCLUSION

La grande qualité architecturale de la tour des Minimes tient à plusieurs paramètres : premièrement, une bonne organisation du travail qui transparait dans le compte de 1495-1496 ; deuxièmement une excellente connaissance empirique des pierres de construction ligérienne, et un usage précis de chacune d'entre elles ; troisièmement, une haute maîtrise technique.

Ainsi, les analyses archivistiques, pétrographiques, granulométriques et statistiques se corrélaient. À travers l'étude de l'analyse granulométrique des mortiers, on a pu vérifier l'hypothèse selon laquelle le chantier du château était divisé en plusieurs pôles d'activité avançant indépendamment les uns des autres. Les mesures d'appareils prouvent un usage homogène des modules de hauteur qu'il s'agisse de tuffeau blanc ou jaune, réparti en neuf modules de hauteur dont les plus grands sont également employés pour les pierres les plus coûteuses, les « blotz » de tuffeau blanc. Les observations macroscopiques des faciès des pierres mises en œuvre coïncident avec la caractérisation des échantillons et vérifient l'emploi de cinq natures de pierres différentes, ce qui

amène à rapprocher certains lieux d'exploitation, comme Saint-Aignan, Les Terriz et Belleroche, issus manifestement d'un même banc. L'identification formelle des dénominations employées dans le compte permet d'avancer qu'environ la moitié des matériaux lithiques mentionnés par le compte de 1495-1496 furent réservés à la tour des Minimes. Enfin, l'étude de la chaux, dans le mortier et dans le badigeon, confirme son origine locale, issue manifestement de deux carrières différentes correspondant au phasage du chantier. Quant à son caractère non hydraulique, il implique de prendre en compte le temps de séchage long puis une carbonatation lente, ce qui semble avoir été apprécié des constructeurs puisque cela « permettrait par la plasticité des mortiers un tassement lent et progressif de la construction au fur et à mesure de son élévation, ainsi qu'une excellente répartition des pressions » (Coutelas, 2009 : 17).

La construction du château d'Amboise offre ainsi l'exemple bien documenté d'un chantier au rythme très soutenu, en activité même en hiver, et où le temps de séchage des maçonneries paraît subsidiaire car c'est bien la qualité des matériaux ainsi que la conception stéréotomique et statique de l'édifice qui assurent avant tout sa pérennité.

## Remerciements

*L'étude présente résulte d'un projet MSH lancé en 2013 par le CESR et porté par Alain Salamagne (Professeur d'histoire de l'Architecture, université François-Rabelais de Tours, CESR – UMR/CNRS 7323) et poursuivi jusqu'en 2016 au sein de la Fédération des Études Supérieures du Moyen Âge et de la Renaissance (CNRS). Nous adressons nos remerciements à la Fondation Saint-Louis qui a autorisé les prélèvements et financé une part des analyses. Les microforages sur les pierres en œuvre ont été réalisés avec l'aide de J.-P. Bakyono et J.-J. Macaire, de l'EA 6293, Laboratoire GéHCO, université François-Rabelais de Tours. Jean-Paul Bakyono a réalisé les lames minces des échantillons. Les clichés en microscopie électronique à balayage des pierres en œuvre ont été réalisés par J.-G. Bréheret grâce à la plate-forme IBiSA de l'université François-Rabelais de Tours. Alexandre Flammang (Service de Lithopréparation – Laboratoire Géoresources – Université de Lorraine) a réalisé les lames minces des mortiers, les diverses analyses ensuite menées sur ces échantillons ont été réalisées avec les moyens de l'Institut Jean Lamour.*

29. Archives Nationales, série KK, *Compte de construction du château d'Amboise (1495-1496)*, f° 205 v°. Lieu appelé « Rillé » dans le compte.

## Bibliographie

- BABONAUX Y., 1970. *Le lit de la Loire. Étude d'hydrodynamique fluviale*, Paris, Bibliothèque nationale, 252 p.
- BARONIO G., BINDA L., 1997. Experimental approach to a procedure for the investigation of historic mortars. In L. Binda, C. Modena (ed.), *Evaluation and Strengthening of Existing Masonry Structures*, Rilem publications, p. 107-116.
- BROSSÉ P., 1982. *Le processus sédimentaire dans le fleuve Loire*. Thèse de doctorat es-sciences, Sciences de la Terre, Université Angers, France, 350 p.
- BÜTTNER S., PRIGENT D., 2007. *Archéologie des liants de maçonnerie : entre traités et réalité*, 4<sup>e</sup> Congrès international d'archéologie médiévale et moderne à l'Institut national d'histoire de l'art, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, du 3 au 8 septembre 2007. *Medieval Europe*, Paris, 2007. [<http://medieval-europe-paris-2007.univ-paris1.fr>].
- COUTELAS A., 2009 (dir.). *Le mortier de chaux*. Paris, Errance, 160 p.
- ELSEN J., MERTENS G., VAN BALEN K., 2011. Raw materials used in ancient mortars from the cathedral of Notre-Dame in Tournai (Belgium). *European Journal of Mineralogy*, v. 23, n° 6, p. 871-882.
- FENEUILLE S., LETOURNEUX J.-P., BOUCHAR M., 2016. *Protocoles d'étude des mortiers anciens à l'usage des archéologues*. Autun, Mergoil, 106 p.
- FOURNIER J., BONNOT-COURTOIS C., PARIS R., VOLDOIRE O., LE VOT M., 2012. *Analyses granulométriques, principes et méthodes*. Dinard, CNRS, 99 p.
- GAUGAIN L., 2014a. Le chantier royal du château d'Amboise : un passage obligé pour les architectes français de la fin du xv<sup>e</sup> siècle? Simon Duval, Martin Chambiges, Colin et les autres. *Revue de l'Art*, n° 183-1, p. 29-36.
- GAUGAIN L., 2014b. *Amboise, un château dans la ville*. Tours/Rennes, PUFR/PUR, 465 p.
- PALAZZO-BERTHOLON B., 2000. Archéologie et archéométrie des mortiers et des enduits médiévaux. Étude critique de la bibliographie. *Archéologie médiévale*, t. 29, p. 191-216.
- PRIGENT D., 2011. Pratiques constructives en Val de Loire du xi<sup>e</sup> au xv<sup>e</sup> siècle. In P. Peduto, Santoro A. (dir.), *Archeologia dei castellanell' Europa angioina (secoli XIII-XV)*, Firenze, éd. All'Insegna del Giglio, p. 41-50.
- PRIGENT D., 2009. La granulométrie. In A. Coutelas (dir.), *Le mortier de chaux*. Paris, Errance, p. 139-144.
- PRIGENT D., 1989. Étude statistique d'appareils à l'intérieur de l'abbaye de Fontevraud. Aspects méthodologiques. *Revue archéologique de l'Ouest*, VI, p. 155-172.