Chapitre 3

L'identification des pierres en œuvre dans le patrimoine bâti

Lise Leroux
Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France
lise.leroux@culture.gouv.fr

D'une façon générale, l'étude des matériaux lithiques de construction présents dans les monuments ou sur des sites archéologiques, qu'il s'agisse de pierres de taille, de moellons ou bien de pierres décoratives, répond à deux objectifs : la connaissance pétrographique et pétrophysique des matériaux mis en œuvre et/ou la détermination de leur aire (voire carrières) de provenance. Procéder à l'identification de la nature et des faciès des différents types de pierres mises en œuvre dans une construction, ainsi que la détermination des zones carrières d'origine, présentent plusieurs champs intérêts.

D'un point de vue archéométrique, cette étude mène à une meilleure connaissance des bâtiments et de leur utilisation, et au repérage des différentes étapes de construction de certains édifices qui ont eu parfois des utilisations multiples, ou ont subi des modifications à travers les âges. Elle mène aussi à une meilleure connaissance du contexte social et économique, et des chemins de circulation des matériaux. La mise en évidence, lors d'une étude archéologique du bâti, d'un matériau en œuvre en grande quantité sur un édifice donné, dont on connait l'aire géographique de provenance, est une force de proposition d'un schéma économique, sachant que les voies d'eau sont systématiquement privilégiées pour le transport des pondéreux et des gros volumes. Les résultats d'identification des pierres en œuvre viennent compléter les interprétations des historiens et des archéologues [1-2].

Ainsi, la présence dans une villa gallo-romaine, de pierres marbrières décoratives provenant de lointaines contrées du pourtour méditerranéen, renseigne sur la richesse des propriétaires.

La présence à l'Antiquité en Loire-Atlantique de grands blocs de pierres calcaires issues des formations du Jurassique exploitées dans le Poitou ou dans le Nivernais et le Berry [3], confirme l'utilisation de la Loire en tant qu'axe commercial majeur,

et indique un engagement fort dans la volonté de réaliser de grands édifices dont les caractéristiques architecturales nécessitent une ressource éloignée (grands blocs d'un matériau présentant une bonne résistance mécanique).

Ces études permettent aussi de mener au mieux les opérations de restauration et de conservation des bâtiments ou des vestiges en question. La connaissance des pierres en œuvre à l'origine permet de choisir, parmi les carrières actuellement en activité, les éventuelles pierres de substitution (de propriétés identiques ou équivalentes, et compatibles), de proposer et d'adapter les techniques de nettoyage aux différentes qualités de pierre, d'aider à la préconisation de traitements de consolidation ou de protection, ...

Si une identification ponctuelle, sur simple échantillon, peut être réalisée en laboratoire, sans déplacement sur le terrain, il est toujours préférable, sur les édifices complexes, de réaliser une étude *in-situ*.

Ce type d'étude complète nécessite la description des constructions, l'observation macroscopique et microscopique des pierres *in-situ* (ce qui implique la nécessité de moyen d'accès aux parties hautes : échafaudage, nacelle élévatrice, ...) et en laboratoire. *In fine* peuvent être réalisées des relevés lithologiques, véritables cartes de localisation des types de pierres sur un bâtiment, qui nous informe sur l'histoire du bâtiment.

La cartographie de la façade occidentale de Notre-Dame-la-Grande à Poitiers [4] a montré une utilisation spécifique de certains types de pierres adaptés à la destination architecturale (calcaire fin de type Migné-les-Lourdines réservé à la sculpture par exemple), a permis de mettre en rapport certaines formes d'altération intense avec un type particulier de calcaire (la pierre de Bonillet), et a aussi mis en évidence la présence de restaurations datant du XIX^{e} siècle dans des zones qui n'avaient pas été mentionnées dans les devis et attachements de maçonnerie de l'époque.

3.1 Quelques rappels de géologie

A quelques exceptions près (hydrocarbures, charbon fossile), les roches sont des assemblages de matières minérales. Les minéraux sont des édifices atomiques qui sont, la plupart du temps, organisés en systèmes cristallins, présentant des directions privilégiées, des périodicités, ... Il existe aussi des minéraux non organisés, amorphes (l'opale par exemple). La reconnaissance des roches sur des bases de composition minéralogique est une démarche pétrographique (calcaire, granite, grès, ...).

On répertorie par ailleurs les roches en trois grandes catégories basées sur leur genèse : classement pétrologique.

Les roches endogènes, ou magmatiques (plutoniques ou éruptives) sont celles issues de la solidification du magma, par remontée lente ou rapide (éruptions volcaniques). Elles sont cristallisées (granite par exemple) ou vitreuses (obsidienne par exemple), en fonction de la vitesse de refroidissement du magma. Ces roches ne contiennent jamais de fossiles. Elles sont composées de minéraux siliceux ou silicatés : quartz, feldspaths, micas, amphiboles, pyroxènes, péridots. Elles sont classées en fonction de leur mode de gisement, de la texture, et de la nature des minéraux qui les composent.

Pour les identifier il faut essentiellement procéder à une étude pétrographique, et particulièrement des analyses minéralogiques.

Les roches exogènes, dont la formation est due aux divers phénomènes se produisant à la surface de la terre, peuvent être regroupées sous le terme de roches sédimentaires. Elles sont stratifiées et susceptibles de contenir des fossiles. Leur formation rentre dans un cycle d'évolution de la matière qui comprend : altération d'une roche préexistante, transport, dépôt/précipitation/évaporation, enfouissement/diagénèse. Pour identifier les natures de ces roches, il est nécessaire de procéder à des analyses d'ordre minéralogique, car elles peuvent être carbonatées (calcaires, dolomitiques), détritiques (argileuses, gréseuses) ou évaporitiques (gypse) ; le contenu fossile quant à lui donnera des indications sur la période et les conditions de dépôt. Une analyse microscopique de la texture, de la matrice, des assemblages et de la forme des éléments contenus dans ces roches, donne des indications sur les conditions de dépôts, ainsi que sur l'enfouissement et la diagénèse.

Les roches métamorphiques sont le produit de la transformation des roches magmatiques ou sédimentaires sous l'effet de contraintes de pression (tectonique et enfouissement) et de température. Ces transformations se produisent soit par déformation mécanique cassante (broyage, meulage, brèches), soit par déformation mécanique souple (plissement et apparition de la schistosité perpendiculairement à la contrainte), soit par recristallisation (par exemple les argiles deviennent des micas). Certains types de métamorphisme génèrent la présence spécifique d'espèces minérales bien particulières (par exemple la sillimanite sera un indicateur de température élevée, l'andalousite associée à la cordiérite indiqueront un métamorphisme de contact, ...). Il peut donc s'avérer nécessaire, pour déterminer la provenance de certaines roches métamorphiques, de réaliser est analyses minéralogiques en laboratoire.

De façon quasi-indépendante de ces classements pétrographiques et pétrologiques, les roches ont des caractéristiques pétrophysiques (dureté, résistance mécanique, masse volumique, porosité, capillarité, ...).

3.2 Approvisionnement des monuments - polylithisme

Le coût, en terme de labeur tant qu'en terme financier, du matériau pierreux mis en œuvre dépendant grandement de son transport, ce sont très souvent des ressources de proximité qui sont sollicitées.

En France, les constructions sont en grande partie réalisées en calcaires, du fait de la forte disponibilité de ces matériaux carbonatés dans les bassins sédimentaires qui couvrent la majeure partie de la surface du territoire (Bassin de Paris, Aquitaine, sillon rhodanien, ...). En fonction des régions, en liaison avec des formations géologiques disponibles localement, se trouvent aussi en œuvre des grès, des arkoses, des schistes, des gneiss, des granites et d'autres roches endogènes, volcaniques et filoniennes, ...

La grande diversité de roches disponibles dans les grands bassins sédimentaires, mais aussi dans les massifs anciens (Massif Armoricain, Massif Central, Vosges, ...) et dans les chaines montagneuses récentes (Pyrénées, Alpes) a entraîné un polylithisme dans

les bâtiments. Ainsi, certaines façades peuvent regrouper l'utilisation de plus de 10 types de pierres différentes, et ce pour des motifs variés.

Les raisons du polylithisme sont avant tout très pratiques.

Localement, dans une même aire d'extraction, on peut trouver des formations géologiques mettant à disposition des pierres aux caractéristiques diverses. Si parfois ces pierres sont mises en œuvre indifféremment dans un édifice, souvent les bâtisseurs ont judicieusement choisi l'emplacement des matériaux selon leurs propriétés physiques. Les pierres les plus résistantes et les moins capillaires sont utilisées en soubassement ou dans des zones particulièrement sollicitées par des arrivées d'eau (corniches, bandeaux, gargouilles, caniveaux, ...) ou d'un point de vue mécanique (colonnettes, dallage, ...). Les pierres les plus tendres et les plus capillaires sont mises en œuvre en parements abrités, voire enduit, ou sont réservées à des usages intérieurs. Moins dures, elles présentent l'avantage d'être travaillées plus facilement. Les plus fines et/ou facile à travailler sont préférées pour la sculpture.

Des choix esthétiques, souvent de couleur (mise en œuvre d'alternance noir/blanc, ...), ont pu être réalisés, parfois en partie guidés par la disponibilité des ressources des carrières locales.



FIGURE 3.1 – Vestiges du rempart du Bas-Empire (chantier de la médiathèque) à Melun (Seine-et-Marne, France) - La grande majorité des blocs sont constitués de calcaire du Lutétien moyen à *Orbitolites complanatus*, contenant parfois des *Ditrupa strangulata*. Ce lithotype n'existe pas dans la région de Melun, ni en amont dans la vallée de la Seine, ni à Paris ou plus loin en aval. Pour le rencontrer il faut aller au Nord-Est de Paris, en particulier dans la vallée de l'Oise, vers Creil. Le faciès à *Ditrupa strangulata* est d'ailleurs appelé banc de Saint-Leu, du nom de la commune de Saint-Leu-d'Esserent. Si on ne peut complètement exclure une éventualité d'extraction dans la vallée de l'Ourcq, affluent de la Marne, il est certain que des exploitations gallo-romaines de ce calcaire sont attestées aux alentours de Saint-Leu-d'Esserent, Saint-Vaast-les-Mello et Saint-Maximin. Dans une même carrière, on peut trouver à la base un niveau contenant *Ditrupa* et *Orbitolites*, et au-dessus un niveau contenant seulement *Orbitolites*. Les hauteurs de bancs y sont telles que les carrières ont pu fournir des blocs de la taille de ceux retrouvés dans le rempart du Bas-Empire sur le chantier de la médiathèque de Melun, et qui sont issus de la destruction d'un édifice majeur de la ville du Haut-Empire. Les bâtisseurs de *Metlosedum* se sont approvisionnés dans une zone géographique éloignée, accessible par voie navigable, pour disposer d'un matériau ayant les caractéristiques adaptées à leurs besoins architecturaux (plus de 60 cm de haut pour parfois plus de 100 cm de long).

Tout ceci sous-entend un facteur économique dans la sélection des matériaux lithiques utilisés pour une construction. Ainsi est favorisé le choix d'une carrière de proximité limitant le coût du transport, ou à contrario d'un matériau de provenance éloignée mais plus facile à extraire et à mettre en œuvre que les ressources locales. Une carrière, quoique plus éloignée, peut se révéler moins couteuse, car propriété du maître d'ouvrage ou du maitre d'œuvre. L'existence d'une industrie extractive bien établie sur certains sites [5-6], avec un savoir-faire et une puissance commerciale, sera une source de pierre à plus ample diffusion. Le besoin spécifique d'une pierre pour des fin décoratives (sculpture, roches ornementales colorées, ...) ou structurelles (grosse colonne monolithe, chapiteau, corniche...) justifie l'utilisation de ressources plus lointaines [2].

Enfin, diverses interventions postérieures à la construction (agrandissement, restaurations, ...) ayant eu lieu sur un bâtiment sont aussi un facteur de polylithisme. À titre d'exemple, les attachements de maçonnerie de Viollet-le-Duc concernant les restaurations de Notre-Dame de Paris en 1849, 1848, 1853 et 1858, indiquent l'utilisation de calcaires provenant d'une douzaine de carrières de la région parisienne, sans compter les pierres bourguignonnes, ...

3.3 Une démarche *in-situ* naturaliste, basée sur l'observation visuelle et la connaissance géologique

Pour une étude pertinente, un site ou une construction doit faire l'objet d'une inspection complète systématique et détaillée, avec report des observations sur un plan ou un relevé d'élévation.

Concernant les pierres de construction (pierre de taille et moellonage), l'examen du site permet de recenser et de repérer visuellement les différents types de pierres en œuvre dans le bâti. Il s'agit également d'en appréhender les usages dans l'architecture ainsi que la répartition spatiale à l'échelle du site ou de la façade étudiée.

Sur le terrain, on réalise des observations macroscopiques, ou à faible grossissement (loupe de géologue, x10). Ces observations visuelles, associées à quelques tests simples (attaque à l'acide chlorhydrique dilué pour distinguer les calcaires des grès, tests de dureté, ...) donnent les indications géologiques de base, d'ordre pétrographique, à savoir la nature des principaux minéraux, la texture (taille du grain, ...), la présence et la nature des fossiles visibles (figure 3.2)... Ces observations permettent très souvent de déterminer la formation géologique et la provenance de la pierre pour un secteur géographique donné.

Cela nécessite évidemment d'avoir une bonne connaissance de la géologie locale, régionale, voir nationale. Une phase de recherche des aires d'extraction des lithotypes reconnus sur un site, par des investigations géologiques des zones environnantes, est parfois nécessaire. La reconnaissance des carrières s'appuie sur l'existence d'indices d'extraction parfois indubitables (fronts de taille, traces d'outils - figure 3.3, éléments architectoniques laissés sur place...), et plus douteux dans le cas de certains affleurements soumis aux agents météoriques et passablement érodés... Dans tous les cas, des échantillons représentatifs peuvent être prélevés sur le terrain pour comparaison avec les lithotypes inventoriés sur le site.

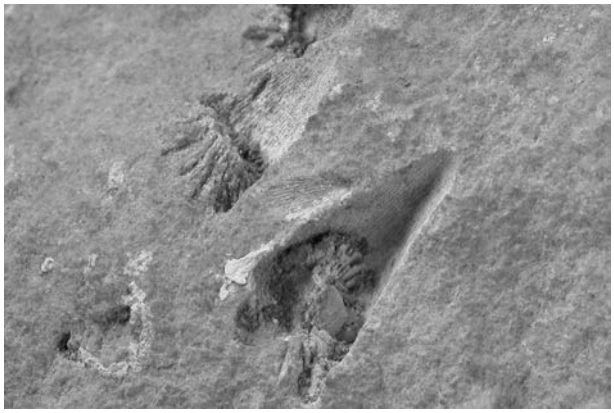


FIGURE 3.2 – Cathédrale de Noyon (Oise, France) (photo Ph. Blanc) - Calcaire fin et dense, contenant du quartz, de la glauconie en plus ou moins grande quantité, et des fossiles *d'Eupsamia trochiformis* (petit polypier de 1 à 2 cm). De façon classique, *Eupsamia trochiformis* est présent dans des sables d'âge Lutétien inférieur, localisés à la base des calcaires à milioles. Ce faciès calcaire induré est atypique. Sa provenance demeure inconnue à ce jour en dépit de nombreuses prospections de terrain, mais est certainement locale car il n'existe pas d'autres grands édifices contenant ces faciès. Il semble aussi que son utilisation se cantonne à la période médiévale.



FIGURE 3.3 – Baruthel (Gard, France) (photo Ph. Bromblet, CICRP) - Front de taille antique dans une zone carrière ayant approvisionné le bâti nîmois et une partie de la Provence depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours.

Concernant les roches marbrières colorées (marbres *sensu lato)* utilisées en décor, l'identification est là encore essentiellement réalisée par observation visuelle, sur la base de comparaison avec des échantillons conservés dans des collections de référence ou grâce aux illustrations d'ouvrages de référence. Ces identifications nécessitent l'expertise de géologues ou d'archéologues habitués à l'étude de ces roches dont la provenance peut-être extrêmement lointaine.

L'identification et la détermination de l'origine géologique des marbres *sensu stricto* (blancs et grisâtres) doit quant à elle se faire par le biais d'analyses en laboratoire (analyses isotopiques, cathodoluminescence, ...) qui nécessitent impérativement un prélèvement.

Chaque lithotype inventorié visuellement peut éventuellement faire l'objet d'une prise d'échantillons représentatifs qui pourront être analysés en laboratoire s'il s'avère nécessaire de mener des investigations complémentaires, ou simplement servir de référentiel pour le site étudié.

3.4 Les techniques analytiques

La plupart du temps des techniques analytiques simples et peu coûteuses suffisent pour procéder à une identification de la nature des pierres en œuvre dans une construction.

In-situ, les observations visuelles, macroscopiques, ou à faible grossissement (loupe de géologue, x10), associées à quelques tests, donnent les caractéristiques pétrographiques essentielles : la nature des principaux minéraux, la présence et la nature des fossiles visibles, la texture (taille du grain, ...). Avec une bonne connaissance de la géologie locale, il est aisé de déterminer la formation géologique d'où est issue la pierre en œuvre, et souvent sa provenance.

Les observations *in-situ* peuvent être gênées par la présence de salissures ou d'une patine qui masquent la nature de la roche, obligeant à provoquer une petite cassure fraiche. Il est des cas où il est préférable de conserver l'objet étudié intact au détriment d'une meilleure connaissance archéométrique.

Ponctuellement, pour des zones très spécifiques, quand il est impossible d'échantillonner, certaines techniques analytiques portables peuvent être utilisées, telle la spectrométrie de fluorescence X qui donnera une analyse élémentaire.

En laboratoire, après prélèvement d'échantillons, on peut réaliser des observations à plus fort grossissement, soit à loupe binoculaire sur cassure fraiche, soit en microscopie optique sur lame mince. Ces observations, plus fines que celles réalisées *in-situ,* vont permettre de préciser le contenu microfossile, la présence de certaines phases minérales, la texture, et donc, éventuellement, d'affiner la zone géographique d'origine.

Dans certains cas, il est nécessaire d'avoir recours à des techniques analytiques plus élaborées, physico-chimiques ou chimiques (diffraction des rayons X, analyses isotopiques, cathodoluminescence, activation neutronique, ...).

3.4.1 Les tests simples à pratiquer sur le terrain ou en laboratoire

— Attaque acide ménagée :

L'utilisation d'acide chlorhydrique dilué (10 %) met en évidence la présence de carbonates dans la pierre, par le dégagement de gaz carbonique produisant une effervescence. C'est donc une excellente méthode pour distinguer les calcaires, les dolomies, des grès, des schistes, les albâtres gypseux ou anhydritiques.

Cette attaque acide ménagée présente l'avantage de pouvoir être réalisée par la dépose d'une petite goutte de HCl dilué directement sur l'objet étudié, si celui-ci n'est pas trop fragile ou précieux (le test peut provoquer un dépoli ou une décoloration). Attention, ainsi pratiqué, ce test peut être perturbé par la présence de produits d'altération ou de traitement (cire) éventuellement présents à la surface de la pierre.

Pratiquée sur un petit prélèvement millimétrique sous loupe binoculaire, l'attaque acide ménagée apporte des informations supplémentaires :

- présence et localisation des carbonates dans la texture de la roche (grains, fossiles, matrice, ...),
- présence d'un résidu après attaque (silice, quartz, micas, argiles, ...),
- retard d'effervescence et odeur fétide permettant de soupçonner la présence de dolomite.

— Tests de dureté :

Chaque espèce minérale ayant une dureté spécifique, les minéraux peuvent être classés par comparaison (capacité de l'un à rayer l'autre), *a fortiori* si la comparaison s'effectue avec deux autres minéraux dont on connaît déjà la dureté.

L'échelle de Mohs est une échelle ordinale, empirique, basée sur la détermination la dureté relative de dix minéraux de référence (voir tableau 3.1), à laquelle ont été ajoutées les duretés mesurées de matériaux usuels.

Il existe des stylets de dureté qui permettent de procéder à ces tests. Mais il est aussi possible d'utiliser des objets courants, constitués de matériaux de référence, qui permettent de déterminer la nature des principaux minéraux constitutifs des roches.

Il faut retenir que le gypse peut être rayé par l'ongle, l'or, argent et le cuivre. La calcite raye ces 4 matériaux et est rayée par le bronze et l'acier. Le quartz raye le verre et l'acier, ce qui n'est pas le cas de la calcite.

Si une roche raye le verre, c'est qu'elle contient du quartz (ou de l'orthose). C'est le cas des granites et des gneiss, ainsi que des roches gréseuses.

— Odeur :

Certains minéraux, tels la pyrite ou la dolomite, et certaines roches riches en matière organique sont susceptibles de dégager une odeur fétide sous l'impact du marteau ou lors d'une attaque acide. Sans être très sélectif, ce test olfactif est néanmoins un d'indicateur de composition et de comparaison.

On sait par exemple que les marbres blancs de Proconèse et de Saint-Béat sont susceptibles de livrer une odeur fétide sous le coup de marteau, même si ce n'est pas dans 100 % des cas.

3.4.2 La microscopie optique

L'observation à la loupe binoculaire (x25 à x100) d'une cassure fraiche d'un échantillon prélevés sur le terrain, apporte beaucoup d'informations sur la microfaune et la minéralogie d'une roche, ainsi que sur sa texture et son espace poral.

Tableau 3.1 – Échelle simplifiée dérivée de l'échelle de Mohs.

Numéro de dureté	Type de minéral	Indices
1	Talc	Friable sous l'ongle
2	Gypse	Rayé par l'ongle
3	Calcite	Rayé par du cuivre
4	Fluorine	Dureté du bronze
5	Apatite	Rayé par un acier ordinaire (couteau)
6	Orthose	Rayé par un sable quartzeux
7	Quartz	Raye le verre
8	Topaze	Rayé par le carbure de tungstène
9	Corindon	Rayé par le carbure de silicium
10	Diamant	Rayé avec un autre diamant

Pour une observation pétrographique plus fine, il faut travailler avec un microscope optique polarisant sur des lames minces. Le géologue peut ainsi décrire la nature, la taille et la forme des grains ou des cristaux, affiner la détermination du contenu fossile et en particulier micro-fossile, caractériser une phase terrigène, préciser la nature et la répartition de la matrice, décrire la forme la fréquence des pores, ...

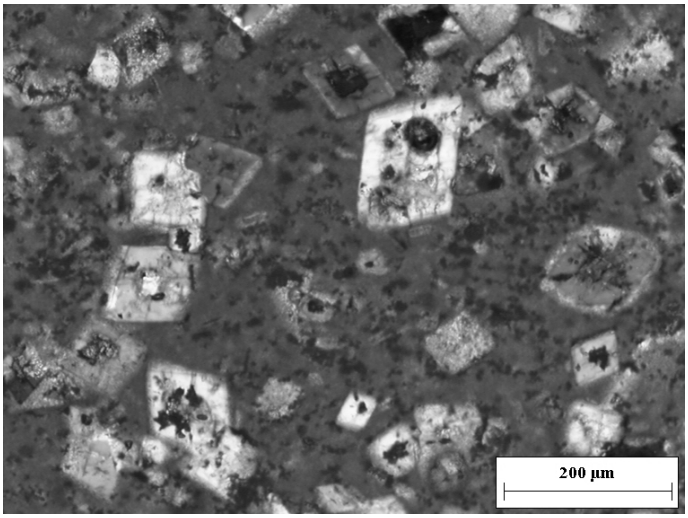


Figure 3.4 – Pierre de Vernon (Eure, France) – Microphotographie en lumière polarisée-analysée d'une lame mince réalisée dans cette craie d'âge Senonien (photo L. Leroux, LRMH) – Matrice micritique ponctuée de cristaux rhomboèdriques, marqueurs d'une phase de dolomitisation caractéristique de cette pierre.

Il est possible à partir de ces observations microscopique de classer les roches selon différents critères (par exemple la classification de Dunham pour les carbonates). Les classifications pétrographiques et pétrologiques des roches sont descriptives, plus ou moins en lien avec à leurs conditions de formation. Prises telles que, elles permettent rarement de déterminer une provenance géographique.

Le travail sur lame mince ne peut être dissocié de l'observation macroscopique de la roche qui apporte des critères complémentaires : couleur, dureté, cohésion, fossiles, géodes, stylolithes, enclaves minérales, minéraux rares, ...

3.4.3 Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une technique analytique qui permet de déterminer la composition minéralogique des roches. À nouveau, c'est un moyen d'étude de la pierre en œuvre qui vient en complément de l'analyse visuelle, surtout si une lame mince n'a pas pu être réalisée.

La diffraction des rayons X est une technique qui, quand elle est pratiquée en routine, nécessite le prélèvement d'un échantillon assez conséquent, que l'on réduit en poudre. Il est cependant possible de travailler avec de faibles quantités de poudre, en utilisant des porte-échantillon neutres adaptés, et donc de limiter le prélèvement sur l'œuvre ou le site étudié. Il faut cependant que cet échantillon reste représentatif.

Cette méthode a l'avantage de fournir une réponse rapide. Il faut garder à l'esprit que pour être détectée, une phase minérale doit être présente en quantité suffisante.

En ce qui concerne les roches magmatiques et certaines roches métamorphiques, cette technique analytique peut se substituer à la lame mince pour mener à l'identification de la roche. Elle permet d'une part de se rapporter aux classifications pétrographiques (granite, diorite, gabbro, ...) et d'autre part de préciser la présence de certains minéraux accessoires caractéristiques. Par exemple la présence de cordiérite dans un gneiss indiquera un métamorphisme régional de haut degré, et permettra d'attribuer la roche en œuvre à une formation géologique particulière, localisable sur le terrain.

Pour les roches sédimentaires carbonatées, cette technique permet notamment de vérifier la présence de dolomite, mais aussi la nature d'éléments détritiques, et en particulier les argiles. Une analyse minéralogique peut éventuellement être menée sur la fraction insoluble (décarbonatée à l'acide acétique à 10 %) afin d'identifier les autres minéraux constitutifs présents en plus faibles quantités, et compléter ainsi la composition. Cela présuppose un volume échantillonné sur place conséquent (plusieurs cm^3).

Pour les roches sédimentaires détritiques (grès) cette technique permet surtout de préciser la minéralogie des grains (quartz, feldspaths, micas), quoique l'observation visuelle y suffise souvent, ainsi que la nature de la matrice.

3.4.4 Techniques d'analyse élémentaires

Les techniques analytique visant à connaitre la composition élémentaire de la matière sont utiles pour l'identification des pierres utilisées en construction dans deux grands cas de figure.

Lorsque d'une pierre présente un défaut ou une particularité très localisée (enclave, filon, géode, ...) dont la nature n'est pas connue, une analyse élémentaire peut s'avérer utile. Sur un petit échantillon que l'on veut conserver, ou pour cibler des zones d'analyse très précises, il est possible de travailler en spectrométrie de fluorescence X ou avec une sonde EDS sous microscopie électronique à balayage. Les appareillages de fluorescence X portables actuellement sur le marché fournissent immédiatement de très bons résultats, et sont donc un complément analytique facilement utilisable sur le terrain.

Par exemple, on peut diagnostiquer ainsi la présence de baryum et de soufre dans des cristallisations pluri-millimétriques observées au sein d'un calcaire mis en œuvre dans un édifice de la région d'Olonne-sur-Mer, ce qui permet de rattacher cette roche à des calcaires d'âge Hettangien contenant des recristallisations de barytine et dont on sait qu'ils ont été exploités et utilisés localement.

Dans certains cas, l'absence de signes distinctifs visuels ou identifiables par les techniques pétrographiques et minéralogiques classiques (présence de fossiles caractéristiques, minéraux accessoires, ...) rend impossible la localisation de la zone d'extraction de la pierre étudiée. Alors, il peut être envisagé de procéder à la quantification des éléments chimiques présents en traces par des techniques d'analyse élémentaire réalisées sur un échantillon global (prélèvement de poudre dans une quantité représentative). Parmi les nombreuses techniques existantes citons l'activation neutronique, l'émission de photons X induite par particules (PIXE), la spectrométrie (ICP-AES, ICP-MS, ...), la spectroscopie sur plasma induit par laser (LIBS), ...

À titre d'exemple, l'activation neutronique a été utilisée pour tenter de distinguer des calcaires de compositions très voisines, utilisés à différentes époques, et provenant de centres carriers différents en France (en particulier les calcaires lutétiens du Bassin de Paris) [7]. Cette technique a été pratiquée avec succès sur des échantillons provenant de la basilique Saint-Denis [8].

Ces techniques analytiques élémentaires se confrontent principalement à une problématique de variabilité au sein des formations géologiques étudiées (variations paléogéographiques, fracturations, circulations de fluides, ...), et donc ne sont pas toujours pertinentes.

Dans tous les cas il faut réaliser, en amont, un travail de référencement, statistiquement valide, sur des roches issues de carrières et d'affleurements, qui permet de déterminer les éléments traces qui doivent être étudiés, et qui sert d'outil de sélection.

3.4.5 Analyses isotopiques

Tout comme l'analyse des éléments traces, les analyses isotopiques peuvent servir à l'identification de provenance de matériaux très homogènes, contenant peu de signes distinctifs. Ces analyses isotopiques ne sont utilisables que s'il existe un référentiel de données concernant des roches issues de carrières et d'affleurements.

L'exemple le mieux connu et le plus utilisé est celui des marbres blancs, pour lequel les analyses isotopiques du ^{13}C et ^{18}O [9-11] permettent de cibler des provenances géographiques. Le référentiel construit à partir de multiples études et issus de la mise

en commun des résultats de dizaines de chercheurs, contient maintenant des milliers de données.

Cette technique analytique, d'usage peu répandu pour les roches de construction qui sont souvent de provenance proximale, peut trouver du sens s'il s'agit de déterminer l'origine de certains matériaux plus prestigieux, ayant voyagés (pierre de sculpture, sarcophages, ...), et donc pour lesquels les sources peuvent être multiples. Encore faut-il établir les données de références, issues de carrières.

3.4.6 Cathodoluminescence

Toujours afin de déterminer la provenance de matériaux lithiques très homogènes, il est possible d'utiliser la cathodolumiscence.

Concernant les marbres blancs, en complément des analyses isotopiques, cette technique a fait ses preuves [12-13].

Pour les calcaires, la cathodoluminescence dépendant grandement de la teneur en manganèse, il est possible d'obtenir une distinction entre deux formations géologiques. Par exemple la réponse spectrale d'une craie de Champagne est différente de celle d'un calcaire blanc et fin du Jurassique supérieur, type pierre de Tonnerre ; ces formations géologiques ayant une couverture géographique large, les carrières ne peuvent pas être déterminées par ce biais.

3.5 Deux outils indispensables : la donnée documentaire et le référentiel géologique

Dans tous les cas, afin de déterminer les zones carrières ayant fourni les matériaux lithiques d'une construction, il est absolument nécessaire de disposer d'une documentation écrite sur la géologie locale. Des échantillons de référence et des résultats d'analyses sont les bienvenus.

Pour le territoire français, en sus des cartes topographiques et géographique de diverses époques, l'ensemble des cartes géologiques au 50000^{e} et au 80000^{e} publiées par le BRGM constitue un fond de consultation de première importance [14]. Indépendamment des descriptions pétrographiques des roches affleurant et de leur localisation géographique, elles indiquent aussi les emplacements de quelques carrières.

Le Laboratoire de Recherche des Monuments Historique dispose d'une documentation à l'échelle nationale sur les carrières et les pierres de constructions constituée depuis les années 1940. Outre les ouvrages de référence récents (actes des différents congrès « Carrières et construction » du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques [15-17], « Terroirs et Monuments de France » [18], ...) qui sont consultables dans bien d'autres centres de documentation, y sont rassemblés des documents anciens (Répertoire de 1889 [19], catalogues de carriers, ...) ainsi que des informations issues des archives départementales, des statistiques géologiques et minières départementales, ... Des dossiers sur plus de 500 monuments et plus de 700 carrières regroupant des renseignements collectés dans la bibliographie, sur les cartes et au cours de missions de terrain ont été constitués. Ils contiennent des plans de localisation des carrières an-

ciennes, des coupes stratigraphiques, des photographies, des observations de terrain, des descriptions de lames minces, des mesures des propriétés physiques des roches.

Cette documentation, adaptée au fonctionnement du service des Monuments Historiques, est limitée aux départements français et partielle en ce qui concerne certaines régions. Elles a servi de fond à la conception de bases de données dont certaines sont consultables en ligne [20-23].

Des ressources documentaires, souvent plus spécifiques au terroir, sont aussi localisées dans les universités de géologie, où, en outre, il existe le savoir-faire associé.

Second type d'outils essentiels, les lithothèques complètent les données documentaires. Au Laboratoire de Recherche des Monuments Historique, environ 6000 échantillons constituent cette collection de référence pour les pierres de taille et les pierres marbrières. Ils proviennent majoritairement d'anciennes carrières étudiées par des géologues au cours de missions de reconnaissance, ou ont été fournis par les carriers (carrières en activité ou abandonnées récemment). Une partie de la lithothèque est constituée d'échantillons issus de monuments. Des lames minces ont été réalisées dans la plupart de ces pierres. Il faut ajouter à cela une collection de 90 plaques polies représentant les principales pierres marbrières françaises ou étrangères utilisés en décoration en France depuis plusieurs siècles, ainsi que divers matériaux utilisés en couverture (schistes ardoisiers, micaschistes, roches volcaniques, grès, calcaires, ...).

Concernant spécifiquement les pierres de construction, le BRGM accueille la collection des échantillons de référence associée au « Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889 » [19].

Pour les régions Provence-Alpes–Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon, le Centre interdisciplinaire de conservation et de Restauration du Patrimoine à Marseille rassemble aussi une lithothèque spécifique aux matériaux du patrimoine bâti [21].

3.6 Études de cas

Les trois études présentées ci-dessous montrent l'apport potentiel du savoir-faire du géologue qui observe les monuments et s'appuie sur la connaissance des carrières anciennes, en s'aidant des cartes géologiques, de la bibliographie, des collections de référence, ainsi que de données archéologiques et historiques.

3.6.1 L'exemple du retable de la Sainte-Chapelle de Vic-le-Comte (63)

La conservation de ce retable datant du XVI^{e} siècle localisé dans la Sainte-Chapelle de Vic-le-Comte, est problématique en raison de la présence de sels qui entraînent son altération. Une identification de la pierre en œuvre a été demandée afin de prévoir au mieux la restauration, et en particulier le dessalement. Dans ce cadre des échantillons ont pu être prélevés par un restaurateur.

L'observation à la loupe binoculaire des échantillons indique qu'il s'agit d'un calcaire fin, microcristallin, de teinte beige, ponctué de plages cristallines qui correspondent à des remplissages carbonatés de vides fossiles (empreinte d'un réseau racinaire). Ces remplissages carbonatés sont bien cristallisés, associés parfois à des oxydes de fer roux.

Des petites fissures sont tapissées d'une couche minérale blanche de nature indéterminable par l'observation visuelle.

Le moule interne en partie tronqué d'un fossile a été observé sur l'un des échantillons : certainement un bivalve lamellibranche, dont l'espèce n'a pu être déterminée.

Cette description correspond aux calcaires lacustres ou palustres du Tertiaire qui se sont déposés dans la Limagne. L'utilisation régionale de ces formations calcaires pour la construction et l'ornementation est connue. Ainsi la documentation du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques concernant les matériaux mis en œuvre à la Sainte-Chapelle de Vic-le-Comte indique :

— pour la construction (1505) et la sculpture monumentale : une arkose jaune provenant d'une carrière située dans le ravin du Binet, près de Vic-le-Comte,
— pour les moulures du portail, les meneaux des grandes fenêtres, la bande de feuillages et de têtes décoratives, des sortes de gargouilles et la sculpture décorative à l'intérieur de la chapelle, un calcaire compact venant de la carrière de Nonette.

Le fichier des carrières indique sur la commune de Nonette (63), l'exploitation d'un calcaire compact (Stampien lacustre de la Limagne) appelé « marbre de Nonette », qui aurait été utilisé dans la balustrade de la Sainte-Chapelle de Vic-le-Comte.

La notice de l'édition de 1925 de la carte géologique au 1/80000e no. 175 (Brioude) mentionne effectivement le marbre de Nonette, d'âge Stampien (Rupélien ; Oligocène inférieur). Il y est décrit comme un calcaire blanc sublithographique, appelé aussi calcaire de Lamontgie, contenant une faune lacustre, dont des gastéropodes (*Potamides lamarcki*) et des vertébrés. L'édition de 1964 de la même carte rapporte ces calcaires compacts à l'Oligocène supérieur. La faune décrite est gastéropode (*Cyclostoma*, *Hydrobia*, *Potamides*, *Limnea*, *Planorbis*). Il n'y a pas de carte récente au 1/50000^{e} couvrant la zone de Nonette.

La carte géologique au 1/50000^{e} no. 718 (Issoire) indique la présence de calcaires d'âge Oligocène sur la commune même de Vic-le-Comte. La notice décrit des alternances de calcaires marneux, dolomitiques, et de marnes. Cette formation, qui surmonte les arkoses utilisées pour la construction de la Sainte-Chapelle, est constituée « par une succession de bancs décimétriques de calcaires feuilletés et de calcaires massifs marneux ou dolomitiques » sur une épaisseur totale d'environ 40 m.

Ainsi, si un approvisionnement depuis Nonette, par l'Allier n'est pas impossible, il est aussi tout à fait possible que les calcaires utilisés pour l'ornementation de la Sainte-Chapelle à Vic-le Comte proviennent de carrières méconnues, proches de Vic-le-Comte.

Des observations et analyses en microscopie électronique à balayage (MEB JEOL 5600LV en low-vacuum, couplé à l'analyse élémentaire avec sonde EDS OXFORD) ont été réalisées sur ces échantillons, pour connaître la nature exacte des remplissages carbonatés et identifier la composition des phases minérales présentes dans le tapissage blanc des petites fissures.

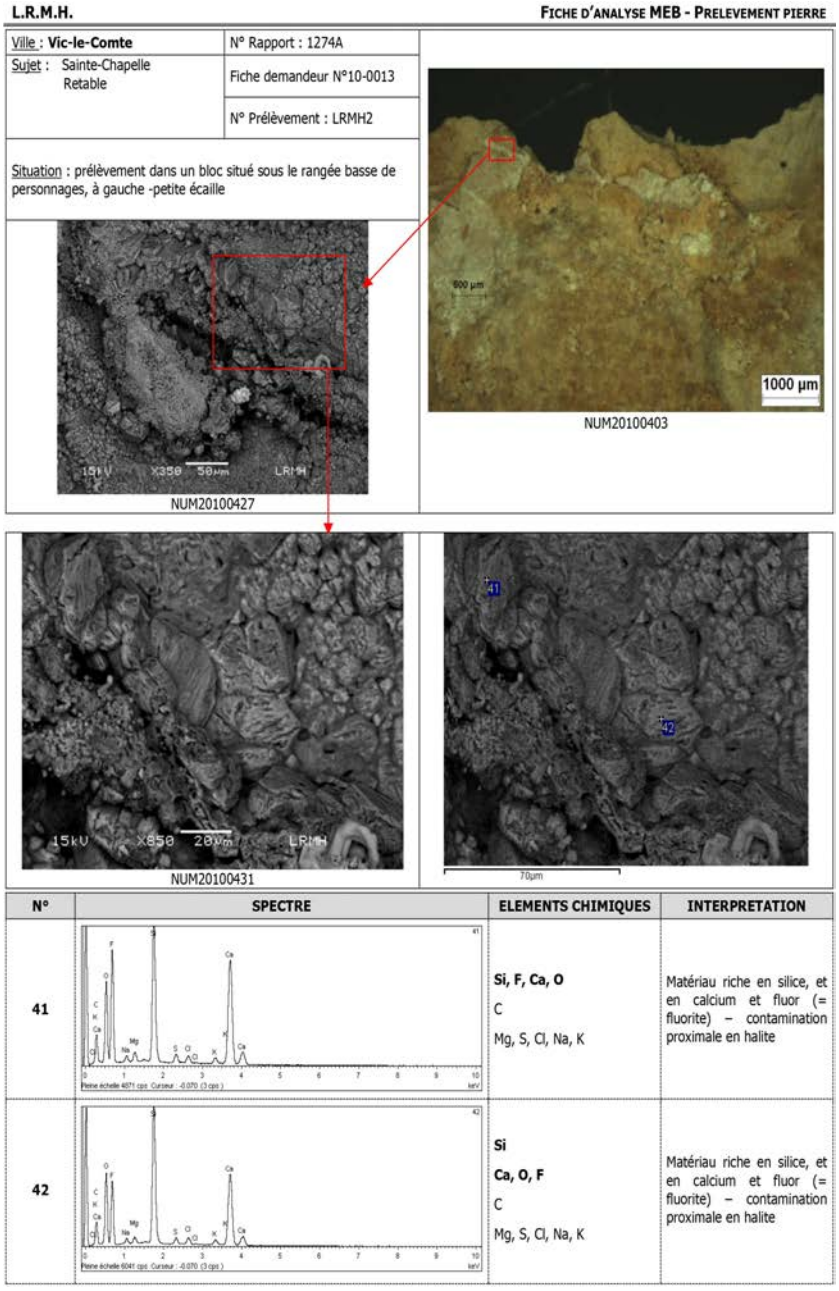


FIGURE 3.5 – Retable de la Sainte-Chapelle de Vic-le-Comte (Puy-de-Dôme, France) (photos L. Leroux, LRMH) - Observations en microscopie électronique à balayage et analyses par sonde EDS laissant supposer la présence de cristaux de fluorite dans la fissuration de la pierre en œuvre.

Elles confirment que c'est un calcaire micritique. Les remplissages cristallins carbonatés sont dolomitiques. La matrice contient un peu argiles, et des traces d'oxydes de fer. La contamination en halite (NaCl) est importante, et bien visible. La matière minérale recouvrant la fissure est constituée pour une bonne part de silice amorphe, et contient beaucoup de fluor, en association avec du calcium. On peut supposer la présence de cristaux de fluorite (voir figure 3.5).

Une analyse en diffraction des rayons X a été réalisée sur une faible quantité de poudre (diffractomètre Bruker D8 Advance, anode Co, détecteur LinxEye Super Speed, porte échantillon monocristal Si), confirmant la présence de calcite, quartz, halite, fluorite et dolomite. On confirme donc que certains cristaux observés dans les couches tapissant la fissure sont de la fluorite. La silice amorphe est peu identifiable en diffraction de rayons X, surtout si elle est présente en faible quantité.

Ainsi ces différentes analyses visuelles, minéralogiques, élémentaires montrent que la pierre utilisée pour la sculpture du retable est un calcaire à matrice micritique, riche en dolomite (remplissage des vides fossiles), faiblement argileux. Ceci correspond aux descriptions des notices des cartes géologiques pour les calcaires d'âge Oligocène locaux.

La carte géologique au $1/50000^{e}$ no. 718 (Issoire) indique que les calcaires oligocènes de la Comté sont des formations dont les couches ont souvent été perturbées par des épisodes volcaniques du Miocènes, de type pépéritique (éruptions phréatomagmatiques). C'est le cas au Nord et à l'Est de Vic-le-Comte. Il y a plusieurs puys volcaniques de ce type à proximité.

On associe à ces épisodes volcaniques la formation de travertins siliceux (opale-calcédoine) qui sont présents aux alentours de Vic-le-Comte (Pignols, Benaud, Saint-Maurice, Busséol). Dans certains cas, des circulations hydrothermales ayant généré une partie de ces silicifications sont envisagées.

Il est donc possible que les fissures du calcaire utilisé pour la sculpture du retable soient tapissées de silice amorphe liée à des épisodes volcaniques d'âge Miocène.

La fluorite est souvent associée au volcanisme dans le Puy-de-Dôme, et peut avoir la même origine hydrothermale. C'est un minéral qui présente des gisements régionaux très connus (Le Beix, Le Puy Saint-Gulmier, Pongibaud, Saint-Jacques d'Ambur, Youx).

Il faut en sus noter que des études récentes ont montré que certaines de ces pépérites possèdent des caractéristiques de carbonatites, sous forme dolomitique. Ainsi il est possible aussi que la dolomite présente dans les calcaires mis en œuvre dans le retable ait *pro-parte* une origine hydrothermale.

Cet ensemble de données plaident en faveur d'une extraction locale du calcaire.

Afin de la confirmer, des investigations géologiques de terrain doivent être menées, dans le but de collecter des échantillons de référence dans les carbonates des alentours de Vic-le-Comte, ainsi que pour vérifier la présence éventuelle d'un hydrothermalisme

à Nonette, secteur soumis à un volcanisme plus récent (Quaternaire), basique (basanite - mandchourite).

3.6.2 La chapelle Saint-Laurent, à Montmorillon

La façade occidentale de cette chapelle date du XII^{e} siècle. Elle a été restructurée au XVII^{e} avec l'ouverture de la baie au dessus du portail. Au XIX^{e} siècle la colonnade a été ajoutée dans la baie. Sept natures de pierres différentes sont mises en œuvre (voir figure 3.6) :

- un grès arkosique à ciment argileux et gros galets noirs, surtout utilisé dans la partie basse,
- une dolomie jaune, mise en œuvre essentiellement dans les parties adjacentes au corps central de la chapelle et dans le parement autour de la baie XVI^{e} siècle,
- un calcaire blanc à fines oolithes, utilisé dans les rouleaux du portail, pour les colonnes et l'entourage de la porte,
- un calcaire blanc fin, un peu plus dur, ponctué d'alvéoles, utilisé pour la sculpture de la frise, les colonnes et les chapiteaux du portail,
- un calcaire oolithique grossier, mis en œuvre au XIX^{e} siècle dans la baie
- d'autres calcaires oolithiques blancs utilisés de façon éparse,
- des calcaires à entroques utilisés soit en restauration soit pour la construction du clocher.

Les cartes géologiques au 1/50000^{e} no. 591 (La Trimouille) et no. 614 (Montmorillon) nous apprennent que les ressources des alentours sont susceptibles de fournir la plupart de ces matériaux. Les grès arkosiques sont probablement issus de la formation dite « grès de Brenne », qui affleure sur les plateaux autour de Montmorillon. De même, dans les environs immédiats ainsi que dans la ville même, sur les rives de la Gartempe, affleurent des terrains d'âge Bajocien constitué de dolomie jaune. Les calcaires blancs fins, plus ou moins oolithiques, ainsi que les calcaires à entroques, ont pu être pris dans les terrains d'âge Bajocien ou Bathonien qui se situent sur les rives de la Gartempe à une dizaine de kilomètres au nord. La même carrière, ou plusieurs carrières voisines, ont pu fournir ces divers types de calcaire. Il est à noter que les sculpteurs ont porté leur choix sur un faciès particulier, sans doute susceptible d'un rendu plus précis du fait de sa dureté légèrement supérieure.

Il est vraisemblable que les calcaires oolithiques utilisés au XIX^{e} proviennent d'une carrière de plus grosse envergure, telle que Chauvigny.

Le relevé lithologique (figure 3.6) a bien mis en évidence les différentes phases de restructuration de la façade, et notamment le déplacement de la frise sculptée médiévale et la surélévation au moment de l'ouverture de la baie. Il subsiste un bloc non déplacé de la frise sculptée, sur le côté nord. Ces travaux du XVII^{e} siècle sont marqués par l'utilisation de dolomie en parement et pour les claveaux de la baie. Certains blocs de grès ont été réemployés en parement, mais surtout entre les modillons sculptés au dessus de la frise, dont le calepinage a été conservé lors du déplacement.

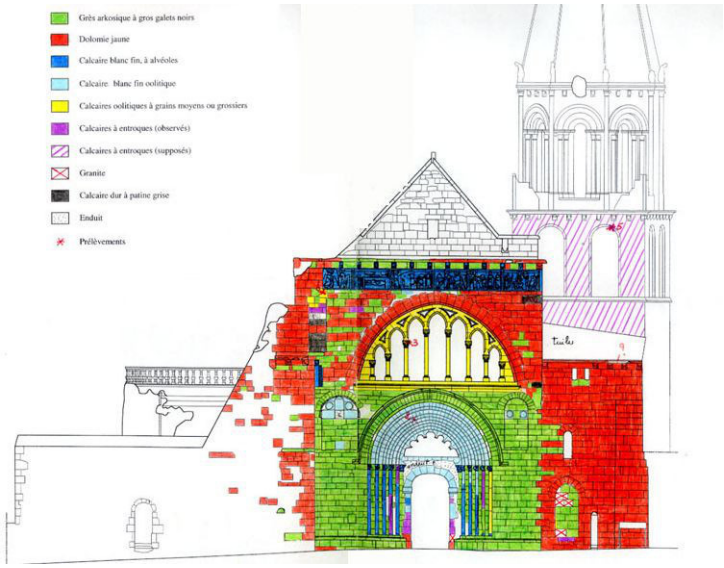


FIGURE 3.6 – La chapelle Saint-Laurent, Montmorillon (Vienne, France) – Carte représentant les différentes pierres en œuvre dans la façade occidentale.

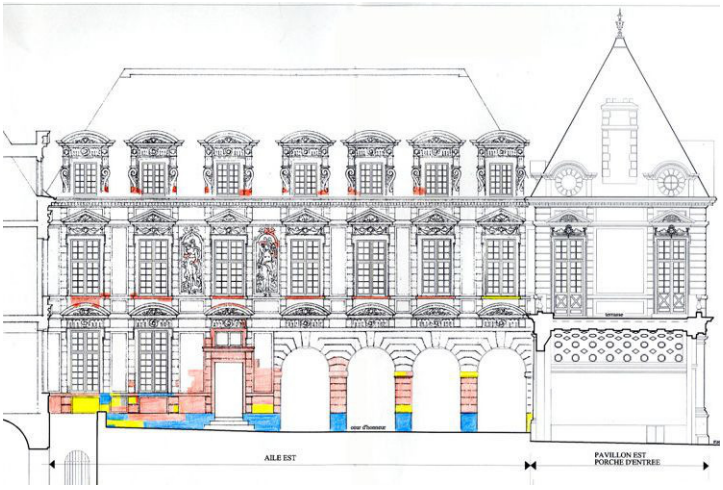


FIGURE 3.7 – Hôtel de Béthune-Sully, Paris (France) – Relevé lithologique de la façade sur cour de l'aile orientale – en jaune : calcaire dur à cérithes, issu des bancs francs parisiens ; en blanc : calcaire à *Ditrupa strangulata* = banc de Saint-Leu ; en bleu : calcaire dur à cérithes de type Saint-Pierre-Aigle ; en rouge : calcaire à texture de lambourdes, de type Saint-Maximin plus ou moins coquillier.

3.6.3 L'Hôtel de Béthune-Sully, à Paris

Afin de réaliser le relevé lithologique des façades donnant sur la cour d'honneur de l'Hôtel de Béthune Sully (XVI^{e} siècle) à Paris, une bonne connaissance des matériaux utilisés dans les constructions parisiennes, ainsi que des carrières exploitées dans le

bassin parisien au cours du siècle dernier, a permis de repérer les pierres de construction d'origine et les zones restaurées.

Les pierres d'origine sont essentiellement des calcaires d'âge Lutétien de provenances diverses, mises en œuvre en fonction de leur caractéristiques physiques.

En soubassement, des calcaires dur riches en cérithes, provenant des bancs francs de Paris et alentours (Lutétien supérieur). Dans le mur bahut de la cour anglaise, le même type de calcaire dur à cérithes a été mis en œuvre, parfois en blocs de remarquable dimension, notamment dans les piliers sous les sphinges.

En élévation, un calcaire plus tendre, contenant des tubes de *Ditrupa strangulata* caractéristiques du banc de Saint-Leu, provenant de la vallée de l'Oise (Lutétien moyen).

Au niveau du porche d'entrée (base des colonnes, ...) et de la base de la porte de l'aile Ouest, un calcaire à milioles (âge Lutétien), fin et dur, blanchâtre. Ce calcaire dont la provenance n'a pas été déterminée, a probablement aussi été utilisé pour la partie basse de la porte du corps de logis, mais aucune observation dans la structure de la pierre n'a permis de le démontrer formellement.

Les deux sphinges sont en marbre blanc et sont posés sur une dalle en liais de Paris.

Cet édifice entre tout à fait dans le schéma de construction observé sur le bâti parisien à partir du XV^{e} siècle, à savoir l'utilisation en soubassement des bancs francs parisiens, durs et peu capillaires, et du calcaire de type Saint-Leu pour les élévations.

On suppose que cet approvisionnement plus lointain qui apparaît sur le marché parisien au XV^{e} siècle correspond à une diminution de réserves disponibles dans les carrières de Paris, en concomitance avec le renouveau du centre carrier de Saint-Leu et Saint-Maximin, dans la vallée de l'Oise. Ce centre carrier était une zone de production déjà fort dynamique à l'Antiquité [24]. Il faut noter aussi que, en carrière, les bancs de pierre de Saint-Leu sont plus épais que les bancs francs parisiens ; il en résulte que les blocs mis en œuvre sont de plus grande taille et permettent peut-être une construction moins coûteuse en temps. De plus cette pierre étant plus tendre elle a pu être sculptée et ornementée plus aisément. Les bâtisseurs, certainement ainsi libérés de certaines contraintes techniques, ont pu envisager la réalisation de façades plus décorées, avec des sculptures plus volumineuses.

Les diverses phases de restauration et de restructuration du bâtiment sont mises en évidence par la présence de calcaires d'âge Lutétien différents, utilisés aussi en fonction de leurs caractéristiques pétro-physiques. Un calcaire dur à cérithes, de type Saint-Pierre-Aigle (Aisne) a remplacé le calcaire dur de Paris. Des calcaires de type Saint-Maximin, parfois grossiers et coquilliers, ou de type Méry-sur-Oise, ont remplacé la pierre de Saint-Leu. La mise en œuvre de ces pierres de restauration est systématique au niveau des baies du rez-de-chaussée, indiquant une transformation importante des façades sur cour, où toutes les portes ont été transformées en fenêtres, modifiant ainsi fondamentalement le mode de fonctionnement de cet hôtel particulier. Des clichés pris par Aget en 1899 montrent que ces transformations ont eu lieu au XX^{e} siècle.

Cette étude a aussi apporté des arguments pour démontrer que les arcatures localisées dans l'aile orientale sont probablement originelles (figure 3.7). En effet, au milieu des nombreux blocs substitués dans cette zone, se trouvent des blocs de calcaires parisien et surtout de calcaire de Saint-Leu dont la position indique que ce ne sont certainement pas des réemplois, mais des blocs mis en œuvre lors de la construction des arches. Or la pierre de Saint-Leu, n'est quasiment plus utilisée à Paris après le XVIII^{e} siècle, du fait de difficultés d'exploitations dans les carrières souterraines [6]. Ce type d'hypothèse pourrait être confirmé, dans le cadre d'une étude d'archéologie du bâti, par l'étude des mortiers de pose et de joint.

3.7 Bibliographie

[1] A. Blanc, F. Blary, J.-P. Gély, L. Leroux, D. Magnan, Géologie appliquée à l'archéologie en Tardenois et en Meldois. Bulletin d'information des géologues du Bassin de Paris. 44(1), 11-20, 2007.

[2] S. Buttner, avec la coll. de L. Leroux, « La pierre : nature et approvisionnement du chantier » dans Saint-Étienne d'Auxerre : la seconde vie d'une cathédrale, dir. Ch. Sapin, Picard, Auxerre/Paris. p. 335-349, 2011.

[3] A. Polinski, « Provenance et utilisation de la pierre dans la basse vallée de la Loire (I^{er} siècle av. J.-C. - VIII^{e} siècle ap. J.-C.) », thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2012.

[4] A. Blanc, C. Jaton, G. Orial, « Étude des matériaux et des altérations de la façade de Notre-Dame-la-Grande de Poitiers avant restauration », Preprints of the International symposium : The conservation of stone, tome II : deterioration, Centro per la conservazione delle sculture all' aperto, Bologna. p. 333-354, 1981.

[5] J.C. Bessac, R. Sablayrolles (eds.), Carrières antiques de la Gaule : une recherche polymorphe. Gallia : archéologie de la France antique, tome 59, 201 pages, 2002.

[6] J.P. Gély, F. Blary, « Les centres carriers de Saint-Leu-d'Esserent et de Saint-Maximin au cours des siècles : développement de l'exploitation et diffusion de la pierre » dans Actes du colloque de Saint-Leu-d'Esserent (octobre 2011) : Saint-Leu-d'Esserent et l'implantation monastique dans la basse vallée de l'Oise, CAHMER, Amiens, Collection Histoire médiévale et archéologie, 25, p. 221-246, 2012.

[7] L.L. Holmes, G. Harbottle, Compositional characterization of french limestone : a new tool for art historians. Archaeometry. 36, 25-39, 1994.

[8] P.Z Blum, avec la coll. de A. Blanc, L. L. Holmes, D. V. Johnson, Fingerprinting the stone at Saint-Denis : a pilot study. Gesta. 33(1), 19-28, 1994.

[9] H. Craig, V. Craig, Greek marbles : determination of provenance by isotopic analysis. Science. 176, 401-403, 1972.

[10] N. Herz, Carbon and oxygen isotopic ratios : classical Greek and Roman marbles. Archaeometry. 29, 35-43, 1987.

[11] D. Attanasio, M. Brilli, N. Ogle, The isotopic signature of classical marbles, Éditions L'Erma di Bretschneider, 297 pages, 2006.

[12] V. Barbin, K. Ramseyer, D. Decrouez, J.S. Burns, Y. Chamay, J.L. Maier, Cathodoluminescence of white marbles : an overview. Archaeometry. 34(2), 175-783, 1992.

[13] Ph. Blanc, « Quantification de la cathodoluminescence des marbres blancs et de leurs minéraux accessoires » dans Actes de la Conférence internationale ASMOSIA IV (Octobre 1995) : Archéomatériaux - Marbres et autres roches, eds. M. Schvoerer, Bordeaux. p. 45-54, 1999.

[14] http ://infoterre.brgm.fr/ Site consulté en Mars 2014.

[15] Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes, Actes 115e Congr. nat. Soc. Sav., Avignon, avril 1990, Éditions CTHS, 464 pages, 1991.

[16] Carrières et constructions en France et dans les pays limitrophes, Actes du 117e Congr. nat. Soc. Sav., Clermont-Ferrand, octobre 1992, Éditions CTHS, 513 pages, 1993.

[17] Carrières et constructions et dans les pays limitrophes, Actes du 119e Congr. nat. Soc. Sav., Amiens, octobre 1994, Éditions CTHS, 525 pages, 1996.

[18] Terroirs et Monuments de France, coord. Ch. Pomerol, Éditions du BRGM, Orléans, 368 pages, 1992.

[19] Anonyme, Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889, Ministère des Travaux Publics, 309 pages, 1890.

[20] http ://monumat.brgm.fr/ Site consulté en Mars 2014.

[21] http ://pierresud.brgm.fr/ Site consulté en Mars 2014.

[22] http ://lapierre.u-bourgogne.fr/atlaspierre/index.php/Accueil Site consulté en Avril 2014.

[23] PIERCENTRE : système d'information sur les pierres et monuments de la région Centre, CD-Rom, Éditions BRGM)

[24] M. Revenu, « Ressources et utilisations de la pierre dans le Bassin parisien à l'époque romaine », thèse de doctorat de l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense, 2009.