



Notre-Dame de Paris - reconstruction des voûtes

l'extraction des pierres a débuté dans la carrière de pierre de La Croix-Huyard

L'incendie du 15 avril 2019 a entraîné l'effondrement d'environ 15 % des voûtes de la cathédrale : la voûte de la croisée du transept - détruite par l'effondrement du tabouret de la flèche - la destruction d'un voûtain de la voûte du transept Nord, causée par la chute d'une ferme de charpente, et celle de deux voûtains et d'un arc doubleau d'une voûte de la nef, engendrée par la chute de la flèche. Cette dernière a également abîmé ponctuellement quelques voûtes du chœur.

La restauration des voûtes réclame 150 m³ de pierres neuves, compatibles avec le monument, dans des quantités plus importantes que celles nécessaires aux travaux ordinaires d'entretien et de restauration des monuments historiques.

Deux grands types de pierre sont nécessaires pour reconstruire les voûtes : des pierres dures, pour la reconstruction des arcs effondrés, et des pierres plus tendres, pour la reconstruction des voûtains des voûtes effondrées ou abîmées.

Dès 2020, l'Etablissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, maître d'ouvrage du chantier, et la maîtrise d'œuvre ont préparé acti-



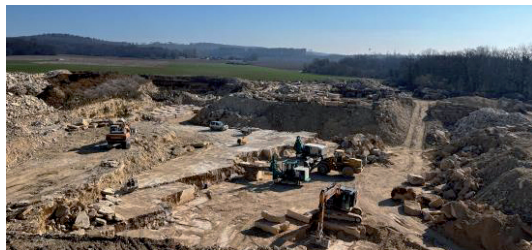
Sur la carrière de La Croix Huyard, de g. à d., Jean-François Horcholle, dirigeant de la carrière, Sophie Hassenforder, cheffe de projet à l'établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, le Général d'armée Jean-Louis Georgelin, président de l'établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, Benoît Horcholle, carrier et dirigeant de la carrière. A l'arrière-plan, Olivier Rambach, directeur commercial de la Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle et Gautier Horcholle, directeur technique à la Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle.

© Etablissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Vue générale de la carrière de la Croix-Huyard (Bonneuil-en-Valois, Oise), fournissant les pierres dures retenues pour le chantier de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris. © 2022 - D. Dessandier, BRGM.



Contrôle en carrière de blocs «bruts» de pierre de la Croix-Huyart (Bonneuil-en-Valois, Oise)
© 2022 – D. Dessandier, BRGM.



Vue de La carrière de la Croix- Huyart. © Olivier Rambach / Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle.



Lavage et sciage des blocs de pierre © Olivier Rambach / Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle



Transport des blocs de pierres de la carrière à l'usine de sciage. © Olivier Rambach / Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle.



Manutention et débit primaire de blocs «bruts» dans l'usine de sciage de Saint-Pierre-Aigle (Aisne).
© 2022 – D. Dessandier, BRGM

vement la sélection des pierres les plus adaptées. Les études de diagnostic menées par les architectes ont permis d'identifier les volumes et les zones nécessitant des pierres neuves.

Sur ces bases, l'établissement public a missionné en juillet 2020 le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) pour identifier les carrières susceptibles de fournir les pierres compatibles sur le plan esthétique et physico-chimiques avec les pierres d'origine.

Ce programme de recherche a permis de démontrer que les carrières du bassin géologique du Lutétien, qui est la source historique de l'approvisionnement en pierre de la cathédrale, étaient en mesure de fournir la totalité des pierres nécessaires au chantier de restauration.

1 000 m3 de blocs de pierre nécessaires à la reconstruction des voûtes effondrées ou abîmées, ainsi qu'à la restauration des baies-hautes, des murs-bahuts et des garde-corps
Neuf carrières, souterraines ou à ciel ouvert, situées dans ce bassin géologique ont ainsi été identifiées dans les départements de l'Oise et de l'Aisne :

- La Croix-Huyart, située à Bonneuil-en-Valois, dans l'Oise, fournit les pierres dures nécessaires

à la reconstruction des arcs des voûtes effondrées et à la restauration des murs-bahuts. Pour sécuriser cet approvisionnement, l'établissement public a mis en place une procédure d'achat direct auprès de cette carrière et remettra les pierres aux tailleurs de pierre.

- Huit autres carrières, situées dans les secteurs de Saint-Maximin (Oise) et de Soissons (Aisne), fourniront les pierres pour la reconstruction des voûtains des voûtes effondrées ou abîmées et les travaux de restaurations intérieures en pierre. Pour ces pierres, un approvisionnement indirect classique est mis en place : les tailleurs de pierre retenus à l'issue des procédures d'appels d'offres se fourniront directement dans les carrières.

Depuis mars 2022, l'extraction et la préparation des blocs a débuté au sein de la carrière de La Croix-Huyart. Dans les prochaines semaines,

d'autres des huit carrières de ce territoire commenceront à fournir les blocs en pierres plus tendres.

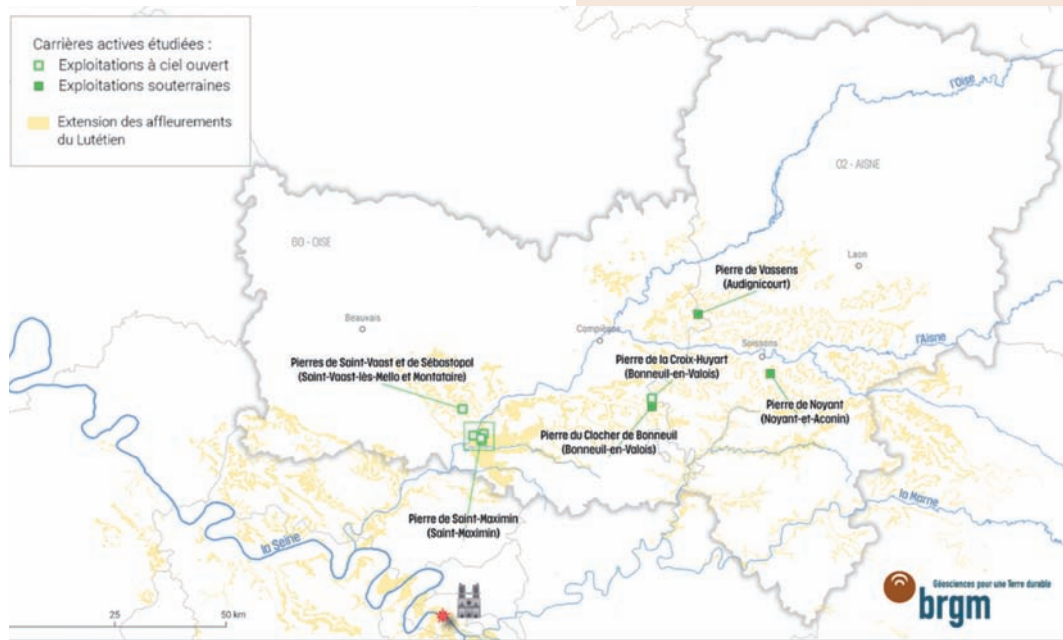
Une fois remises aux tailleurs de pierre, les pierres seront taillées en atelier ou sur le chantier. «*Je suis heureux d'être aujourd'hui dans l'Oise, à La Croix-Huyart, où une partie des pierres nécessaires au chantier de restauration est en train d'être extraite et façonnée. Il s'agit d'une étape importante qui marque le début de la reconstruction des voûtes qui permettra à la cathédrale de rouvrir au culte et à la visite en 2024. J'étais en décembre en Mayenne pour le sciage des chênes de dimension exceptionnelle qui serviront à restituer la flèche et il y a quelques semaines dans l'Hérault, pour la restauration du grand orgue. Je me réjouis que la France entière soit au chevet de Notre-Dame*», souligne le Général d'armée Jean-Louis Georgelin, président de l'Etablissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Les pierres de

Initialement extraites du sous-sol parisien, principalement en galeries souterraines, les pierres utilisées à l'époque médiévale sur la cathédrale Notre-Dame de Paris appartiennent essentiellement à la formation géologique du «Calcaire grossier» d'âge lutétien (Éocène moyen - Ère Tertiaire).

Cette formation affleure en de nombreux secteurs du Bassin parisien - plus grand des trois bassins sédimentaires français, il couvre la majorité de la moitié Nord de la France avec une superficie de 110 000 km² environ - et se trouve encore aujourd'hui exploitée au Nord de Paris pour la fourniture de pierre de construction, dans neuf carrières souterraines ou à ciel ouvert, situées dans les départements de l'Oise et de l'Aisne. Chacune de ces carrières rassemble plusieurs sous-types de pierres correspondant à des bancs de caractéristiques distinctes aux propriétés esthétiques, pétrominéralogiques, et physico-mécaniques distinctes. Comme tous les grands monuments pluriséculaires, la cathédrale Notre-Dame de Paris a fait l'objet, au cours du temps, de nombreux chantiers d'entretien et de restauration incluant la dépose d'éléments lapidaires d'origine et leur remplacement par des pierres neuves.

L'épuisement progressif des gisements de calcaire lutétien présents dans le sous-sol parisien couplé à la croissance urbaine ont nécessité le



Carte de localisation des 9 carrières actives dans l'Oise et l'Aisne. © BRGM.

Notre-Dame de Paris

recours dès le XVIIIème siècle à des pierres de remplacement, c'est-à-dire appartenant certes à la même formation géologique (le «Calcaire grossier» du Lutétien) que les pierres originelles issues du sous-sol parisien, mais provenant, au fil du temps, de carrières de plus en plus éloignées de la capitale (la Grande Couronne, l'Oise et l'Aisne).

A partir de la seconde moitié du XIXème siècle, avec les grands travaux lancés par Viollet-Le-Duc, l'usage de calcaires lutétiens «de remplacement» s'est amplifié. Ces chantiers importants ont simultanément nécessité de recourir à des pierres de substitution, c'est-à-dire appartenant à d'autres formations géologiques que le Lutétien et issues depuis d'autres bassins français d'extraction, dont celui couvrant la Bourgogne notamment. Il est désormais avéré que l'emploi de pierres exogènes pose à terme des problèmes de conservation des parements. Ce seront donc des pierres de remplacement qui seront utilisées sur le chantier de restauration de la cathédrale.

A propos des pierres nécessaires au chantier de restauration de la cathédrale (2021-2024)

Le chantier de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris nécessite un approvisionnement important en pierres, afin de remplacer

celles disparues ou trop endommagées pour pouvoir être réemployées. Ces pierres de construction doivent être compatibles du point de vue esthétique et physico-chimique avec les pierres d'origine encore en place sur le monument, et pour certaines être disponibles en grandes dimensions. Il faut donc des pierres neuves - dites de remplacement - dans des quantités plus importantes que celles qu'entraînent les travaux ordinaires de restauration des monuments historiques. Le besoin total en pierres est estimé par la maîtrise d'œuvre à 1 000 m³ «sciés 6 faces».

Le chantier de restauration de la cathédrale nécessite deux grands types de pierre :

- 500 m² de pierres dures, pour la reconstruction des arcs des voûtes effondrées et la restauration des murs-bahuts,
- 500 m² de pierres plus tendres, pour la réalisation des travaux de restaurations intérieures ainsi que pour les voutains des voûtes effon-



*Les blocs amenés dans l'usine de la SN Saint-Pierre Aigle.
© Olivier Rambach*



Vues de La carrière de la Croix-Huyart. © Olivier Rambach

Les pierres de Notre-Dame de Paris (suite)



Vues de l'usine de transformation de la SN Saint-Pierre Aigle.
© Olivier Rambach



drées ou abîmées.

Compte tenu de ce contexte, l'approvisionnement en pierres pour le chantier fait l'objet de deux procédures distinctes :

- Pour les pierres dures : un approvisionnement direct par la maîtrise d'ouvrage, en provenance de la carrière de La Croix-Huyart (Oise). Cet approvisionnement en pierres dures est nécessaire aux travaux de reconstruction des voûtes effondrées ou abîmées par endroits et de restauration des murs-bahuts.

- Pour les pierres plus tendres : un approvisionnement indirect classique, par les tailleurs de pierre retenus à l'issue des procédures d'appels d'offres pour effectuer les travaux de restaurations intérieures - notamment pour les oculus des pignons, les parements des transepts, le dallage des terrasses, les gargouilles et chimères, les couvertures des édicules, les fleurons, les garde-corps, les maçonneries et sculptures, les pinacles du chevet et les remplages des baies hautes - et pour les voutains des voûtes effondrées ou abîmées.

Le marché avec la carrière de La Croix-Huyart

Les volumes de pierres nécessaires à la reconstruction des voûtes détruites ou abîmées

et la restauration des murs-bahuts sont plus importants que ceux nécessaires aux travaux ordinaires d'entretien et de restauration des monuments historiques. De plus, il est nécessaire de travailler dans ces zones avec une pierre de la même origine géologique que celle identifiée dans la cathédrale.

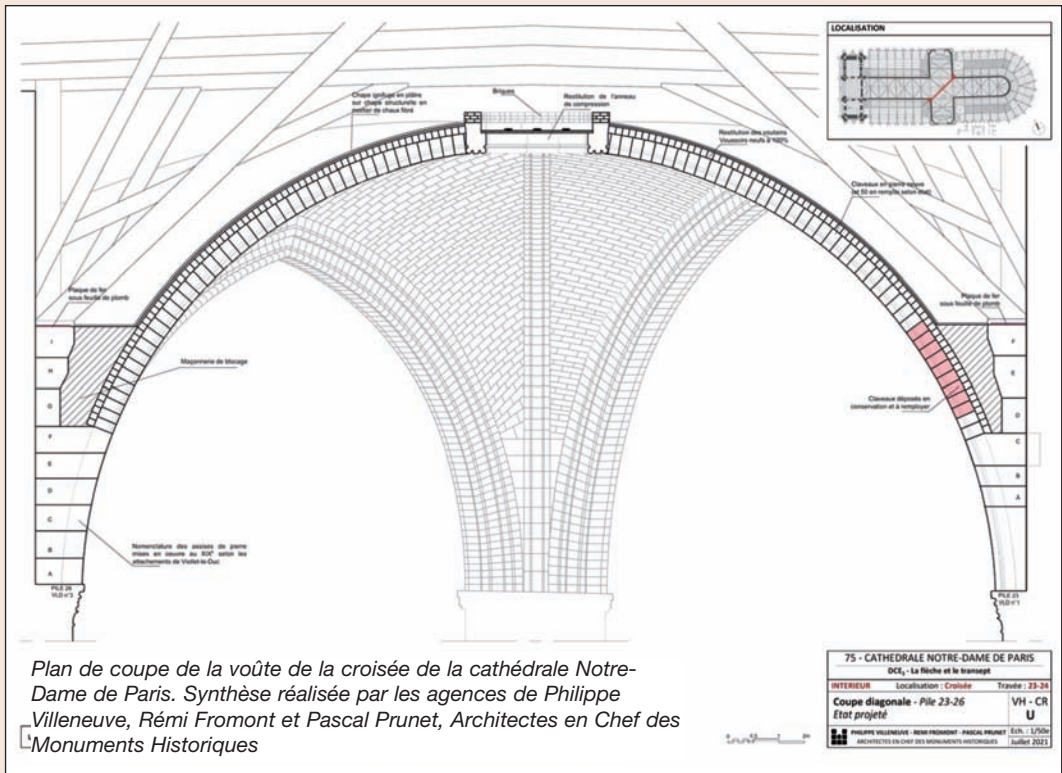
En juillet 2020, l'Etablissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris a donc missionné le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) pour mener un programme de recherche et développement portant sur l'identification, la caractérisation et la sélection de nouvelles pierres esthétiquement et physiquement compatibles avec les pierres endommagées.

Avec l'aide des Architectes en Chef des Monuments Historiques (ACMH) et du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), le BRGM a remis à l'Etablissement public un guide d'identification et de sélection des pierres pour la restauration de la cathédrale prenant en considération :

- les caractéristiques physico-mécaniques,
- la compatibilité esthétique avec le monument.

Pour la pierre dure, des analyses physico-mécaniques ont identifié plusieurs pierres, mais l'aspect esthétique a permis d'arrêter le choix sur la carrière de La Croix-Huyart. Il s'agit de pierres de remplacement, c'est-à-dire appartenant à la même formation géologique (le «Calcaire grossier» du Lutétien) que les pierres

Les pierres de Notre-Dame de Paris (suite)



Plan de coupe de la voûte de la croisée de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Synthèse réalisée par les agences de Philippe Villeneuve, Rémi Fromont et Pascal Prunet, Architectes en Chef des Monuments Historiques

originelles de la cathédrale.

A la demande de la maîtrise d'ouvrage, le BRGM a également recherché des pierres dans des bassins géologiques différents des pierres d'origine, dites pierres de substitution. Cette recherche n'a finalement pas été approfondie car l'étude a permis de démontrer que le bassin du Lutécien suffisait à fournir les pierres nécessaires, ce qui constitue une solution préférable pour la bonne conservation à long terme de la cathédrale.

Le marché conclu avec La Croix-Huyart comprend :

- l'extraction de la matière à la carrière de La Croix-Huyart, dans l'Oise,
- le sciage 4 faces au sein de l'usine de La Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle (associé à la carrière de la Croix-Huyart), dans l'Aisne,
- le stockage des blocs sciés jusqu'à leur réception par les tailleurs de pierre attributaires des travaux.

Mode opératoire

A La Croix-Huyart, les carriers extraient la matière brute selon le calendrier d'approvisionnement établi avec l'Etablissement public, maître d'ouvrage. Le BRGM se rend en carrière pour une première étape de contrôle-qualité sur

blocs bruts

A l'usine de sciage La Société Nouvelle Saint-Pierre Aigle, les carriers procèdent au sciage sur 4 faces des blocs extraits : les blocs sont d'abord "lavés" (on appelle «lavage» une coupe fine sur le bord du bloc) afin de permettre au débiteur de vérifier qu'il n'y ait pas d'imperfection dans le bloc de pierre. Puis, ils sont débités aux dimensions choisies.

Le BRGM effectue à l'usine une seconde étape de contrôle-qualité, sur blocs «sciés 4 faces».

Les blocs qui ont satisfait aux deux étapes de contrôle, sont stockés sur place sur une aire dédiée en attendant leur sciage ultérieur en éléments de forme et dimensions particulières.

Enfin, les tailleurs de pierre viennent se fournir, afin de tailler les blocs sur leurs six faces puis de les sculpter, soit en atelier, dans l'entreprise de taille de pierre retenue pour ce qui concerne les ouvrages les plus simples, soit directement sur le chantier pour les réalisations les plus délicates.

Les bancs utilisés ont une hauteur maximale de 60 cm.

Le rôle du BRGM

Durant la phase de sélection des pierres (2020-2021), le BRGM a permis d'identifier et de

Les pierres de Notre-Dame de Paris (suite)

sélectionner, au sein des carrières françaises actives, des pierres «neuves» :

- compatibles selon des critères esthétiques et physico-mécaniques avec les pierres d'origine de la cathédrale.

- disponibles pour certaines en blocs de dimensions exceptionnelles (hauteur d'assise importante, longueur plurimétrique).

Ce premier projet effectué dans le cadre d'une convention avec l'Établissement public a donné lieu à un guide de sélection des pierres de restauration de la cathédrale, constitué principalement :

- d'un «Référentiel des pierres d'origine de la cathédrale», fournissant des données détaillées sur la trentaine de types de pierres calcaires inventoriées sur la cathédrale.

- d'un «Référentiel des «pierres de remplacement», fournissant des données détaillées sur 32 pierres calcaires d'âge Lutétien (Miocène) issues de neuf carrières de l'Aisne et de l'Oise, associé à une 1ère collection d'échantillons représentatifs.

- d'un «Référentiel des pierres de substitution» fournissant des données détaillées sur dix pierres calcaires d'âge Bathonien (Jurassique moyen) issues de huit carrières actives en Charente, en Côte-d'Or et dans l'Yonne, associé à une seconde collection d'échantillons représentatifs.

Durant la phase d'approvisionnement du chantier en pierres (2022-2024), le BRGM a pour mission principale d'assurer le contrôle-qualité des différents types de pierres sélectionnées pour le chantier de restauration de la cathédrale.

Pour ce faire, le BRGM a mis au point fin 2021, compte-tenu du niveau exceptionnel d'exigence du chantier, un protocole original dit de «contrôle-qualité et de traçabilité de pierres», incluant des vérifications à différents stades de la chaîne de production des pierres.

Principales étapes pour la reconstruction des voûtes et des murs-bahuts (2020-2024)

- Juillet 2020 - mi-2021 : convention de recherche et développement entre le BRGM et l'Établissement public chargé de la conservation et de la cathédrale Notre-Dame de Paris, maître d'ouvrage du chantier, pour mener un programme portant sur l'identification, la caractérisation et la sélection de nouvelles pierres esthétiquement et physiquement compatibles avec les pierres endommagées.

- Février 2022 : contractualisation du marché de fourniture, traitement et stockage liant l'établissement public et la carrière de La Croix-Huyart



Pendant le Salon Rocalia, en novembre dernier à Lyon, Lise Leroux (LRMH) et David Dessandier (BRGM), ont présenté leurs travaux réalisés dans le cadre de la préparation du chantier de restauration de Notre-Dame de Paris.

- Mars 2022 - début 2023 : extraction de la matière à la carrière de La Croix-Huyart et découpe des blocs. Contrôle qualité simultané mené par le BRGM avant l'envoi des blocs en usine de sciage.

- Mi-mars 2022 – mi-2023 : sciage des blocs à La Société Nouvelle Saint-Pierre Aigle. Contrôle qualité simultané mené par le BRGM avant stockage.

- Été 2022-fin 2023 : mise à disposition progressive des blocs sciés aux tailleurs de pierre attributaires des lots de travaux correspondants, qui vont tailler les pierres en atelier ou sur le chantier.

- 2023-2024 : reconstruction des voûtes détruites et abîmées, restauration des murs-bahuts

Principales étapes pour les restaurations intérieures en pierre (2020-2024)

- Juillet 2020 - mi-2021 : convention de recherche et développement entre le BRGM et l'Établissement public chargé de la conservation et de la cathédrale Notre-Dame de Paris, maître d'ouvrage du chantier, pour mener un programme portant sur l'identification, la caractérisation et la sélection de nouvelles pierres esthétiquement et physiquement compatibles avec les pierres endommagées.

- Printemps 2022 : attribution des appels d'offres des travaux de restaurations intérieures qui se fourniront en pierres auprès des neuf carrières de l'Oise et de l'Aisne, présélectionnées par le BRGM.

- Juin 2022-2024 : travail des tailleurs de pierre, en atelier ou sur le chantier, retenus à la suite des procédures d'appels d'offres, et réalisation des travaux de restaurations intérieures en pierre.