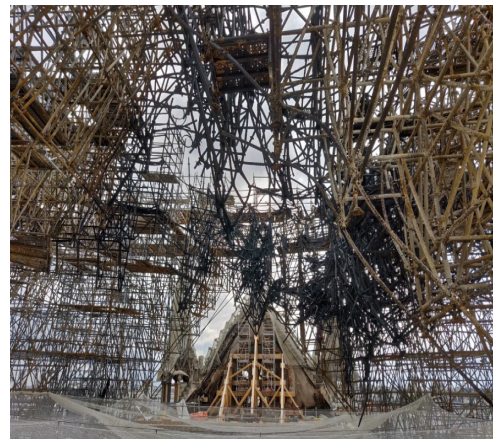
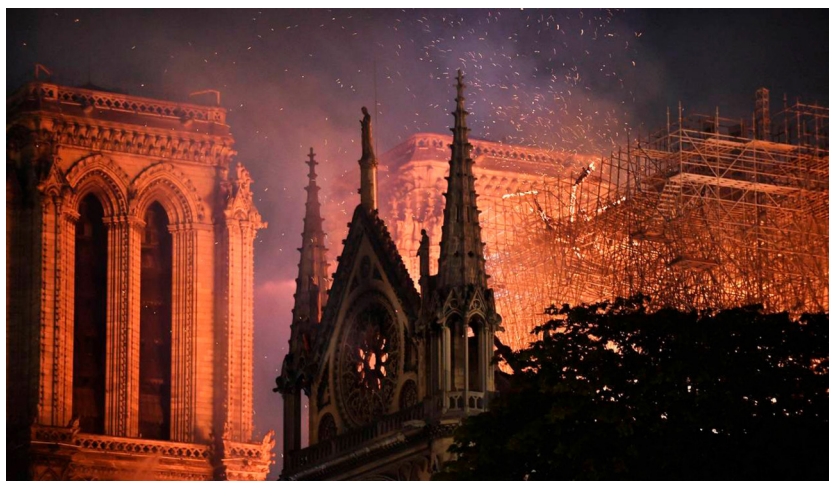


Incendie de Notre-Dame de Paris

Evolution de la situation de reconstruction

Une synthèse des articles sur le sujet de [monumental]* de 2019 à 2021

par Gérard Mouillaud, président de l'ADASTA



Cette sélection de photos impressionnantes est suffisante, mais nécessaire, pour résumer l'ampleur de l'incendie du 15 avril 2019. On imagine les dégâts conséquents et les obstacles rencontrés pour faire un bilan des avaries et décider des bonnes actions à mener pour la remise en état du monument.

Dans les pages suivantes nous trouverons des explications concernant la fragilisation des éléments touchés et les remèdes pouvant être apportés ainsi que



quelques surprises et coups de chance.

Il va sans dire, mais mieux en l'écrivant, que les travaux vont être longs et difficiles pour tous les artisans concernés. Nous espérons qu'ils ne seront pas bâclés pour répondre à des échéances sans grand intérêt, mais soignés pour rendre hommage à ceux qui nous avaient laissé ce chef-d'œuvre de l'humanité.

GM



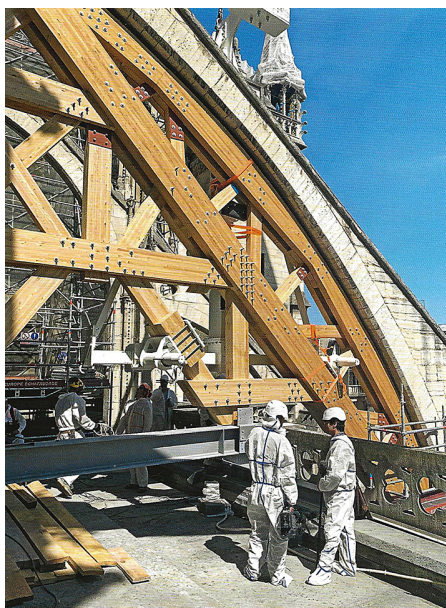
Numéros 2019-2, 2020-1 et 2, 2021-1 et 2

NDLR. Le 28 octobre 2021, lors d'une petite conférence, nous avons présenté un état des lieux sur les travaux en cours. La parution du numéro du deuxième semestre 2021 de [monumental] n'a pas apporté d'éléments vraiment nouveaux car les phases de mise hors d'eau du chantier, de renforcements divers des structures et de dépollution du plomb restaient primordiales avant les restaurations proprement spécifiques et ces tâches sont très longues et difficiles.

Les photos reproduites dans cet article, sauf précision, proviennent de la revue [monumental] ou disponibles sur Internet.

LES PREMIÈRES INTERVENTIONS.

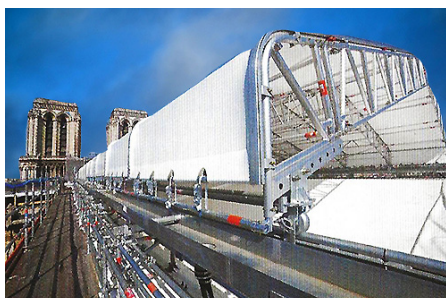
Il a fallu commencer par le renforcement des arcs-boutants, éléments principaux dans la tenue de la construction.



Ne pas oublier que ces arcs sont à la base de la résistance des constructions gothiques qui se caractérisent par des murs fins et hauts.

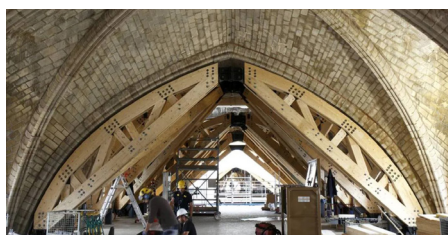
Ensuite tous les murs ont été testés par des cordistes équipés d'un pendule de type Mouton Charpy. Cet instrument permet d'estimer la dégradation d'un élément par le rebond d'une petite masse sur sa paroi. Si la pierre de calcaire est fissurée ou feuilletée la résonance est amortie et le pendule ne remonte plus autant (perte hystérique).

Il est compréhensible que les travaux ne pouvaient s'envisager tant que les matériaux étaient saturés ou dans un état de déséquilibre hydrique marqué. L'eau d'extinction avait été évacuée et en partie évaporée mais des intempéries sur des zones mal pro-



tégées avaient provoqué des infiltrations. Ce n'est que depuis août 2021 que la mise hors d'eau totale des parties hautes de l'édifice est assurée avec la pose d'un parapluie coulissant sur la nef, le chœur et la croisée et de bacs aciers sur le transept.

Côté renforcement, fin 2021, sept voûtes du chœur du bras nord de la nef et du transept avaient été étayées. Elles reposent sur des cintres en bois avec vérins hydrauliques.



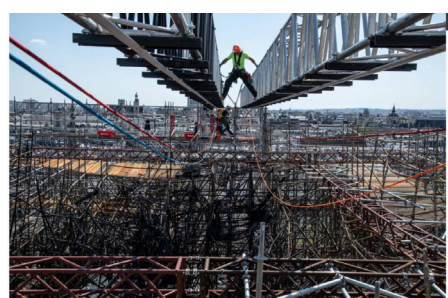
Après ce besoin essentiel de renforcement et de sécurisation des accès se présentaient deux problèmes majeurs se présentant pour commencer les travaux :

- l'encombrement métallique par l'échafaudage de la flèche,
- une pollution généralisée du site par le plomb de la couverture.

La première intervention concernait le démontage de l'échafaudage de la flèche. Celui-ci avait été mis en place en vue d'une restauration programmée de la flèche. Nous laissons à l'enquête le soin de déterminer si les travaux concernés sont à l'origine de l'incendie.

Cet échafaudage a considérablement souffert de l'incendie car la température de déformation de l'acier se situe entre 1050°C et 1300 °C.

Il s'en est suivi une déformation globale avec instabilité et des tubes plus ou moins soudés. Des



cordistes ont dû procéder à plusieurs mois de multiples amarages et découpes.

ÉLÉMENTS ET MATÉRIAUX CONCERNÉS PAR LES FLAMMES

- le bois de la charpente, de la flèche
- le plomb de la couverture
- l'acier des échafaudages
- les pierres calcaires des murs et des voûtes
- les pierres calcaires des sculptures
- le cuivre des statues de la flèche
- les vitraux
- les peintures des chapelles
- le grand orgue

Mais, c'est connu pour tous les incendies, les matériaux sont aussi touchés par l'eau d'extinction :

- les pierres des murs et des voûtes
- les vitraux, les peintures...

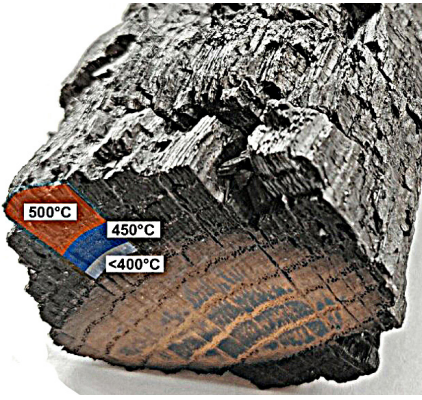
Le bois de la charpente entièrement ou partiellement brûlé était irrécupérable. Pour les matériaux non combustibles il fallait connaître la température atteinte pendant l'incendie.

TEMPÉRATURES ATTEINTES

« Lors de la carbonisation du bois, entre 400°C et 1300°C, les molécules organiques deviennent aromatiques et l'épaisseur des couches polyaromatiques ainsi formées augmente significativement avec la température (jusqu'à quelques nanomètres).

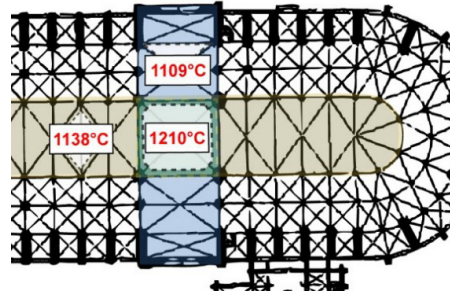
La spectrométrie Raman est extrêmement sensible à ces variations [les niveaux de chacune des bandes du spectre augmentent avec la carbonisation. NDLR] » (Deldicque et al., 2016 ; Rouzaud et al., 2015).

Une courbe d'étalonnage a donc été construite à partir de la carbonisation entre 500 et 1300°C de morceaux de chêne non brûlés lors de l'incendie du 15 avril 2019 et déterminée par paléothermométrie Raman

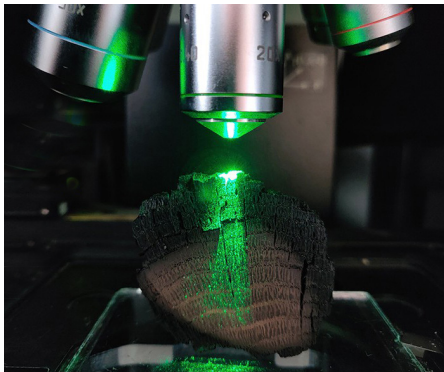
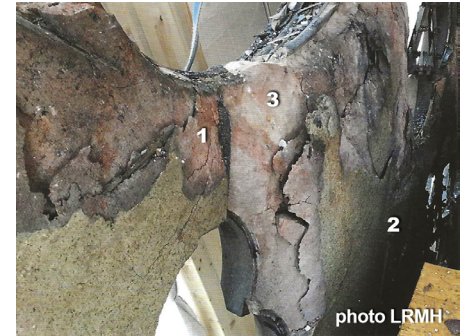


température de vaporisation du plomb (1749°C). La pollution du plomb trouvée dans le quartier Notre-Dame ne peut donc pas être due à l'évaporation du plomb au sens strict.

du liquide), par exemple lors d'activités de soudage, de coupage à haute température et de brûlage. Avec l'éloignement de la source calorifique, la vapeur se condense en particules solides. Des gouttelettes en suspension dans l'air peuvent être entraînées. ».



ACTION DE LA TEMPÉRATURE SUR LES PIERRES CALCAIRES



[...] Cependant, une migration aérienne de nanoparticules d'oxyde de plomb (aérosols) peut également être envisagée.

De plus il n'est pas exclu que le plomb puisse provenir de la corrosion et du lessivage du plomb dans les toits de la cathédrale avant l'incendie. Il aurait alors pu migrer sous forme de carbonates, hydroxydes, ... ».

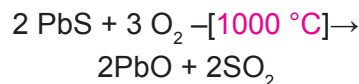
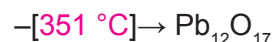
Sur cet oculus particulièrement touché on voit bien l'évolution attendue pour une surface calcaire portée à haute température :

Damien Deldicque et Jean-Noël Rouzaud du Laboratoire de Géologie de l'École Normale Supérieure rapportent [HAL 02914610]:

« Premièrement, les températures les plus élevées constatées, à savoir $1212 \pm 79^\circ\text{C}$, renseignent sur l'état physique du plomb du toit et sa possible diffusion à l'intérieur et à l'extérieur de la cathédrale. Ces températures ont permis au plomb d'atteindre son point de fusion (330°C) comme en témoignent les nombreux flux resolidifiés de plomb liquide visible sur les murs ...

[...] les températures les plus élevées (un maximum de 1300°C) sont nettement inférieures à la

Le plomb forme avec l'oxygène une grande variété de composés stables ou métastables. Les réactions suivantes montrent les différents composés pouvant être rencontrés avec un tel incendie.



250-300°C - [1] Rubéfaction : la goethite beige (hydroxyde fer α -FeOOH) se transforme en hématite (α -Fe₂O₃) rouge.

400-700°C - [2] Noircissement par combustion en milieu réducteur (absence d'oxygène) des matières organiques donnant un dépôt noir de carbone minéral dans les porosités de la pierre.

700-900°C - [3] Blanchiment par décarbonatation de la calcite (CaCO₃) en Chaux vive (CaO) :



La couche est millimétrique mais le problème de la chaux vive est sa structure pulvérulente. Lors de l'intervention des pompiers, l'eau d'extinction a transformé la chaux vive en chaux éteinte selon une réaction exothermique et une augmentation du volume de 20%. Il s'en est suivi une dislocation et un foisonnement de la surface entraînant une réduction de la résistance de la pierre.



On a tout lieu de penser que les dépôts constatés sont constitués d'un mélange de tous ces produits

Les vapeurs de métaux rencontrées dans les opérations de soudure étant dangereuses, voici un extrait d'une Fiche de Sécurité de l'Ontario :

« On trouve des vapeurs de plomb lorsque celui-ci ou des matériaux en contenant sont chauffés à plus de 500°C (évaporation au dessus

LA CHAPE DES VOÛTES

Les voûtes étaient recouvertes d'une couche 5 à 15 cm de plâtre. Tout d'abord l'hydratation du plâtre évolue avec la température :

Le plâtre : *hydrate ou gypse*
 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

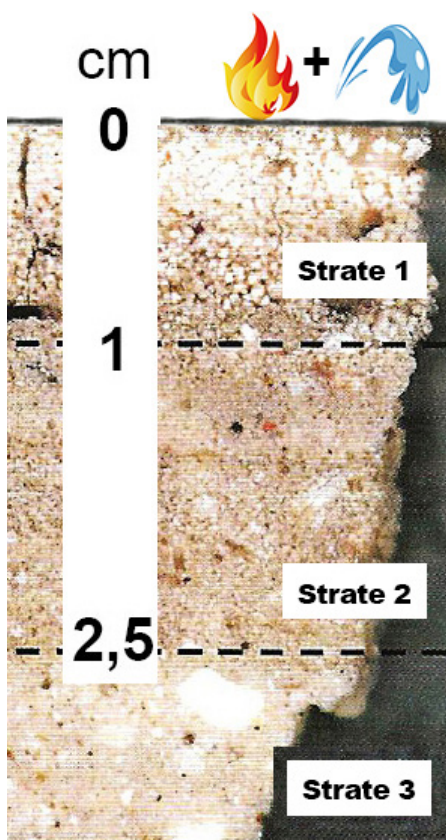
à 90-120°C : *semi-hydrate* -
 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$

à 150-300°C : *anhydrite II* (β)
et *III* (α) - CaSO_4

En fait, au moyen âge la chape était constituée d'un mélange : gypse + anhydrite II + résidus de charbon de bois, calcite, quartz... Cette couche s'est révélée d'une grande importance dans la préservation des voûtes.

Examen d'une coupe effectuée sur la chape :

Sur la surface touchée par les flammes, puis par l'eau d'extinction on trouve un dépôt vert olive < 1mm et des particules de suie, Pb, PbO...



Strate 1

- gypse majoritaire + anhydrite II
300°C atteints puis réhydratation forte

Strate 2

- gypse majoritaire + semi hydrate
120°C atteints mais <300°C
une partie du gypse s'est hydratée

Strate 3

- idem strate 2 mais plus de semi-hydrate
120°C atteints mais pas d'action de de l'eau d'extinction

On admet que la base de la flèche a été fragilisée au point de céder sous son poids en raison de la décarbonatation de la calcite en chaux vive, mais aussi par l'absence de cette protection apportée par la chape de plâtre.

UN PHÉNOMÈNE DE PSEUDOMORPHOSE

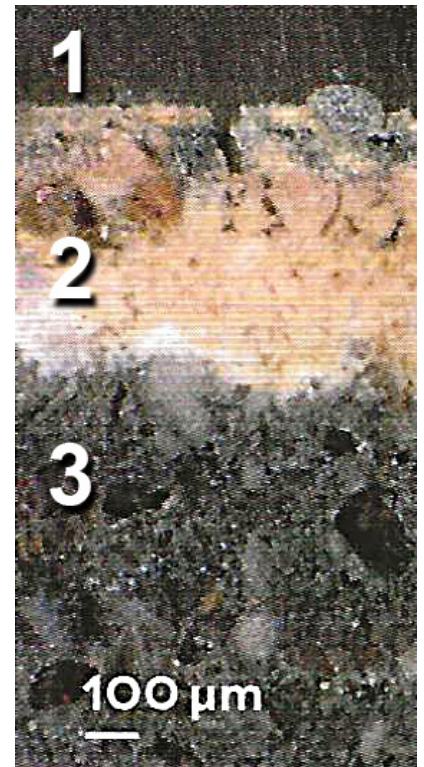
En dehors du problème de pollution, il se trouve que le plomb interviendrait encore dans l'apparition d'un phénomène physico-chimique appelé pseudomorphose, réaction qui s'est produite entre le calcaire et la vapeur de plomb. Or, nous avons vu que le plomb n'avait pas atteint sa température de vaporisation.



Sur un des murs où apparaissait la couleur verdâtre il a été prélevé un échantillon de 1 cm d'épaisseur environ (zone de prélèvement). La coupe, en épaisseur, montre :

1 - Une couche discontinue de 100µm avec une bille de plomb.

C'est un dépôt friable jaune à vert olive de 0,1 mm à quelques



millimètres : tapis irrégulier de polyèdres (grains de quartz) et de microsphères (Pb métal, α -PbO, β -PbO) de 0,1 à 1 mm de diamètres

2 - Une couche de pseudomorphose de 600µm.

La présence d'un grain de quartz montre que la structure de la pierre n'a pas été changée mais seulement sa nature chimique. C'est une zone de transformation liée à l'interaction de la chaux CaO et de la vapeur de plomb au-dessus de 700-800°C. Cette pseudomorphose est inédite. Il s'agit de la formation d'un Orthoplombate de calcium (Ca_2PbO_4).

Surpris de cette «vaporisation à basse température» nous avons contacté Mme Véronique Vergès-Belmin, responsable du pôle pierre au LRMH qui a bien voulu nous apporter cette précision :

A partir de la fusion du plomb, sa tension de vapeur augmente avec la température. On peut considérer que c'est bien dans une interface chaux vive-vapeur de plomb que la réaction de pseudomorphose s'est produite.

3 - La pierre est noircie car portée à plus de 400°C.

RESTAURATION DE LA CHARPENTE

La Charpente de N-D
longueur120 m
largeur nef13 m
largeur transept.....40 m
hauteur10 m



Selon **Frédéric Epaud**, spécialiste des charpentes médiévales au CNRS:

« Depuis 2015, nous disposons des relevés précis de la charpente effectués par les architectes Rémi Fromont et Cédric Trentesaux et de 150 scans de la charpente réalisés en 2014 et remis par l'entreprise Art graphique et Patrimoine.

La charpente de N-D n'a demandé qu'un milliers de chênes : 97% de moins de 60 ans d'âge (diamètres 25-30 cm) et une trentaine plus vieux pour un diamètre de 50-60 cm.

Il n'y aura aucune difficulté pour trouver les 1000 arbres nécessaires, qui seront déposés sur le parvis pour être immédiatement équarris.

En effet, les bois utilisés dans les charpentes médiévales étaient taillés verts et mis en place après leur abattage.

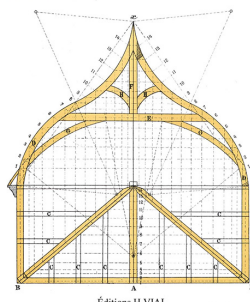
Il faut respecter la taille des fûts à la doloire et non à la scie pour garantir leur résistance et leur tenue à la déformation.»

Pour un besoin de 1300 chênes, 21 ha de forêt seraient concernés or la chênaie française couvre 6 millions d'hectare.

Le 25 mars 2021, la Commission nationale du patrimoine et de l'architecture (CNPA) a approuvé de

rebâtir la charpente avec 2000 chênes tirés des forêts de Chantilly, Ermenonville et Chaalis, plus le chêne dit de «Madame Del Duca» provenant de la forêt du Der (Haute-Marne).

BILLON FRÈRES L'ART DU TRAIT DE CHARPENTERIE



La copie ne sera pas conforme à l'original, mais à cœur de promouvoir l' "Art du tracé de charpenterie français" inscrit en 2009 sur la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité de l'UNESCO.

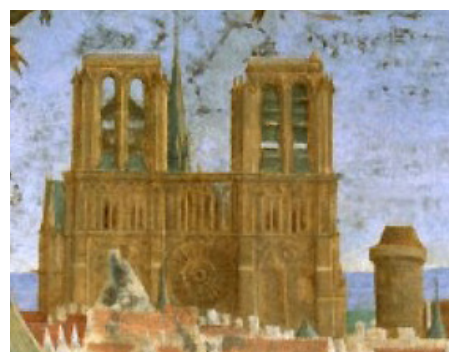
La commission a cependant rejeté l'abattage à la hache et le sciage au long traditionnel «trop chronophage», pour privilégier le sciage mécanisé avec finitions main.

1000 chênes ont été abattus dans l'hiver 2021 et sciés dans l'été suivant. Une deuxième sélection sera coupée dans l'hiver 2022 pour la restauration du grand comble de la nef et du chœur.



Rappel: les murs des édifices gothiques étaient haut mais ne pouvaient supporter des poids élevés. La charpente devait être la plus légère possible.

LA FLÈCHE A RECONSTRUIRE



Cet extrait d'une peinture de Jean Fouquet de 1460 montre la première flèche qui sera, par sécurité, démantelée entre 1786 et 1792.



Une peinture de Johan Barthold Jongkind en 1852 prouve l'absence de flèche sur la cathédrale. La nouvelle flèche sera commencée par JBA Lassus en 1853 et poursuivie par Viollet-le-Duc jusqu'à son décès en 1857. Elle est inaugurée le 15 août 1859.

Le 25 mars 2021, la CNPA a décidé de restituer la flèche et les toitures du transept à l'identique du dernier état dit Viollet-le-Duc, décevant certains architectes futuristes.

La charpente de la flèche sera traitée comme le reste de l'architecture bois. Les plans sont parfaitement connus.

Nous restons sur la flèche car c'est là que le hasard a limité la catastrophe

COUP DE CHANCE POUR LE COQ ET LES STATUES DE CUIVRE

Situé au sommet de la flèche le coq a été sauvé par l'effondrement de celle-ci et sa chute dans la nef. Il en est ressorti seulement cabossé. Sans cela il n'aurait pas résisté à la température car le cuivre fond à 1085°C



Les statues des apôtres, dessinées par Violet-le-Duc et façonnées par Adolphe Geoffroy-Dechaume datent de 1861.



L'ensemble concerne quatre groupes de trois apôtres avec, à leur pieds les symboles des évangélistes (lion, taureau, aigle et ange).

Elles avaient été descendues le 11 avril 2019 en vue d'une restauration prévue sur trois ans! Toutes ne seraient pas tombées avec la flèche et auraient fondu.

Ces statues sont creuses et les feuilles de 1 mm de cuivre repoussé sont soutenues par une structure métallique (comme le sera la statue de la Liberté en 1886).

Les peaux de cuivre avaient été recouvertes (en 1880 ou 1935-37), y compris les zones de brasure, d'une formulation à base de brochantite ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$), sulfate hydraté qui résulte de l'oxydation naturelle du cuivre et présentent des éclats de couleurs différentes. Elles sont restaurées par l'atelier de la SOGRA, à Marsac-sur-l'Isle, selon :

- traitement des armatures internes par phosphatation, revêtement époxy et peinture polyuréthane afin d'éviter l'électro-corrosion due au contact fer-cuivre),

- sur les plaques de cuivre, application d'une patine brune (sulfure et polysulfure de potassium puis couche de dichromate d'ammonium passée et chauffée au chalumeau et couche finale de cire).



LES VITRAUX

Les vitreries losangées des pignons nord et sud ont été soufflées.

Les vitraux historiés n'ont pas été arrosés pour éviter les chocs thermiques et l'explosion des verrières.

Les 25 baies hautes ont été déposées (25 avril-3 mai 2019) pour permettre l'accès aux travaux d'urgence et le passage des cintres de renfort. La grande majorité des vitraux est laissée *in situ*.

Une dizaine de restaurateurs et maîtres verriers ont été contactés. Chacun a reçu une fiche de documentation historique et une photographie d'ensemble de chaque baie.

Les panneaux ont été descendus par le monte-charge ou après une mise en conteneur descendus de la terrasse avec une grue.

LES GRANDES ORGUES

Elles ont été déposées le 9 décembre 2020.

Les tuyaux ont été recouverts d'un dépôt de suie, de Pb et PbO. Ils ont souffert des fortes variations thermiques notamment, après coup, lors de la canicule de juillet 2019.

Les opérations de démontage et nettoyage sont faites par deux équipes de 5 facteurs d'orgue équipés de masques à ventilation assistée.



Le marché de restauration est confié aux ateliers Cattiaux-Chevron (tuyaux bois et métal) et Quoirin et à la Manufacture languedocienne des grandes orgues (parties mécaniques). Le buffet reste *in situ* pour être traité. Les travaux, sous la direction de Christian Lutz et Éric Brottier, ont débutés en octobre 2021 et vont durer jusqu'au printemps 2024.

Après remontage il faudra ensuite, comme nous l'avons écrit dans l'article La-la-land de AS n°93 procéder à l'harmonisation de l'instrument (l'accorder). Cette opération peut durer plusieurs mois car une fois installé dans la cathédrale l'orgue et son environnement devront être stables en température et humidité.

LES PEINTURES DÉCORATIVES

La chapelle St-Germain avait été nettoyée en 2018 ce qui a servi pour établir un protocole de restauration.

DÉPOLLUTION DU PLOMB

Il a été relevé à l'intérieur de l'édifice de 12 000 à 15 000 µg/m² pour un seuil de 5 000 µg/m² maxi pour un espace public !

Les opérations se sont succédées avec :

- aspiration, avec filtre Hepa qui filtre 99,97 % des particules de diamètre supérieur ou égal à 0,3 µm,
- passage de papier absorbant avec eau déminéralisée,
- passage d'un gel polyacrylique + 2% de TAC (triammonium citrate)

Travail long mais le protocole est suivi sans risque de pollution par le plomb pour les opérateurs.

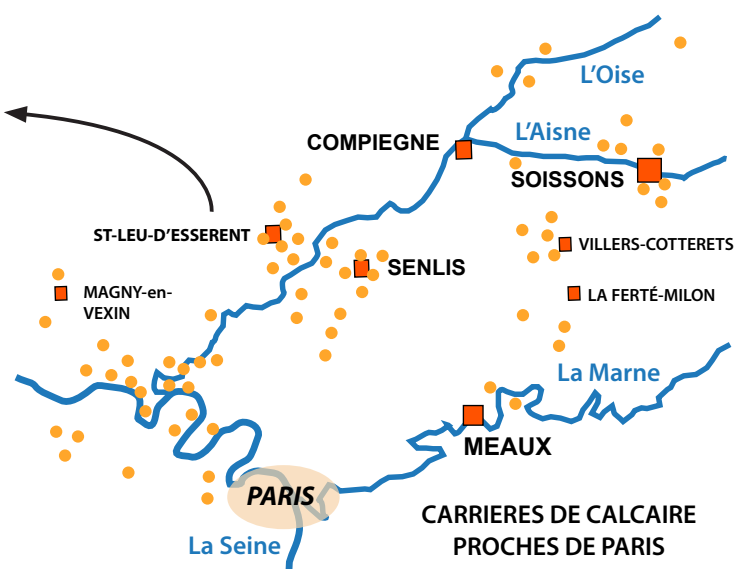
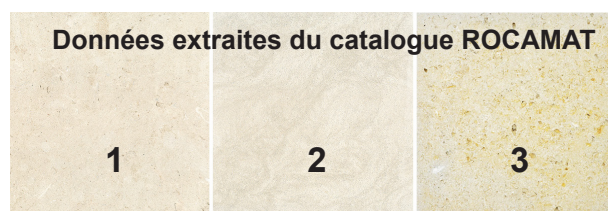
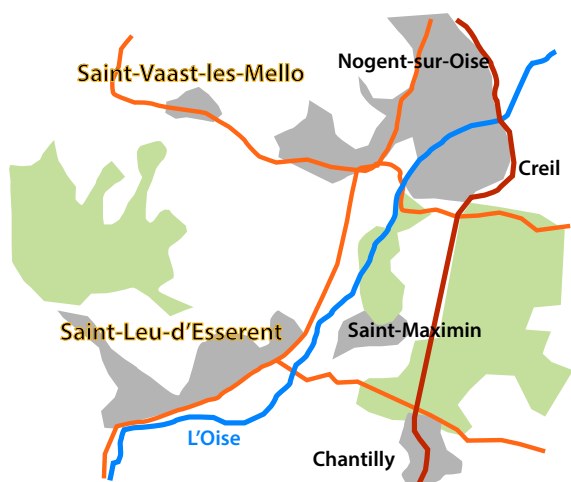
REMPLACEMENT DES PIERRES CALCAIRES

Les pierres de Notre-Dame provenaient de carrières souterraines sous les 5^e et 12^e arrondissements de Paris (autour des catacombes). Ces carrières ne sont plus exploitées mais les carrières de calcaire dit lutétien sont nombreuses. Elles permettent de donner des pierres adaptées à chaque fonction (décoration, balustrade, construction,...), encore faut-il qu'elles soient en activité. La réouverture de certaines, loin de Paris, n'est pas exclue mais difficile pour des raisons réglementaires et écologiques. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de calcaires différents provenant de la zone réputée St-Leu-St-Maximin-St-Vaast située à une quarantaine de kilomètre au nord de Paris.

Certaines pierres restées en bon état après l'accident seront retailées. Pour les pierres fragilisées, un traitement par des bactéries capables de produire de la calcite dans des fissures, ayant montré son efficacité dans d'autres lieux, sera sans doute adopté. Ce procédé appelé **biominéralisation** est d'une valeur sûre puisqu'utilisé par les diatomées, les coraux, les os et l'émail des dents.

Pour terminer on doit signaler le problème lié à la présence de renforts métalliques (chaînages, liaisons entre blocs) ayant provoqué des coulures ferrugineuses et des fissures de dilatation. Il faudra traiter et inhiber les zones concernées. A noter que la composition chimique des fers permettra de dater plus exactement les étapes de construction (XII^e-XIII^e ou XV^e-XVI^e ou plus tardif).

Carrière	Saint-Leu (1)	Saint-Vaast Fine	St-Maximin Liais (2)	St-Maximin Const. (3)
Masse volumique kg/m ³	1500 à 1700	1500 à 1700	2100 à 2300	1900 à 2100
Porosité %	35 à 45 %	35 à 45 %	15 à 25 %	25 à 35 %
Rtce compression MPa	5 à 7 MPa	4 à 6 MPa	30 à 60 Mpa	10 à 20 MPa
Rtce à la flexion MPa	1 à 3 MPa	1 à 3 MPa	4 à 9 MPa	3 à 5 MPa



Front de taille à la carrière de St-Vaast