

# OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Audition du 23 mai 2019 consacrée à la restauration de Notre-Dame de Paris

THEME : LA RECHERCHE AU SERVICE DE LA RESTAURATION DES MONUMENTS HISTORIQUES

Pr. Yves MALIER, Académie des technologies, <[www.yvesmalier.com](http://www.yvesmalier.com)>

Monsieur le Président Gérard LONGUET, Monsieur le Vice-Président Cédric VILLANI,

Mesdames et Messieurs les Parlementaires,

Par mes travaux antérieurs en laboratoire de recherche et en entreprise, j'ai, comme plusieurs d'entre nous ici aujourd'hui, un point de vue sur le mode de reconstruction.

Pour ma part, je considère comme impératif de reconstruire à l'identique.

Mais, reconstruire à l'identique au XXIème siècle ce qui fut érigé aux XII, XIII, XIV et XIXème siècle ne peut se faire sans le respect de conditions liées à l'environnement, au développement durable et à l'économie circulaire, sans l'emploi de méthodes de modélisation et de conception actuelles et, beaucoup plus encore, sans l'emploi des matériaux contemporains les plus performants par leur résistance à l'incendie, leur durabilité, leur légèreté, leur mise en œuvre rapide, aisée et validée par de nombreux grands ouvrages de même nature architecturale, enfin par leur faible empreinte écologique et par leur capacité esthétique à s'intégrer dans un projet qui doit d'abord être, avant tout, respectueux des contraintes historiques et architecturales de NOTRE-DAME de PARIS.

Dans le court temps imposé pour introduire l'audition d'aujourd'hui, je ne parlerai que de la charpente et de la couverture qui doivent, pour des raisons de protection des intempéries et de protection des travaux de restauration dans les parties inférieures, être proches de la première phase de reconstruction.

En ouverture de mon propos, je ne peux oublier la remarquable restauration de la cathédrale de REIMS après les bombardements et incendies de 1914. Dix ans plus tard, Henri DENEUX, architecte en chef des Monuments Historiques, décida une reconstruction de la charpente en utilisant des poutres en béton armé préfabriquées en usine puis montées et assemblées sur le site. Cet apport de la modernité ne sembla jamais être un handicap par rapport à la restauration de la cathédrale redevenue « identique » à celle de l'origine (rappelons que le béton est un matériau très ancien utilisé par les Macédoniens et les Indiens bien avant que VITRUVIUS en soit le premier « théoricien », il y a plus de vingt siècles).

C'est donc dans cette perspective de retour à l'identique que j'exprime, aujourd'hui et devant vous, mon avis.

Pour cet avis, je m'appuie sur mes expériences passées très diverses de chercheur et d'ingénieur. Docteur d'État en physique sur le thème des effets du feu dans les grandes structures de génie civil, créateur et co-responsable d'une PME de « déconstruction » jadis classée première mondiale de sa spécialité par les américains, conseiller scientifique de deux Présidents d'entreprises de construction du CAC 40, j'ai aussi souvent été expert sur des consolidations d'ouvrages après incendie et/ou séismes (cathédrale de Mexico, grands immeubles à Bucarest, tunnel sous la Manche...).

Un temps directeur au Ministère de l'Équipement du département « Matériaux et Structures pour grands ouvrages » du LCPC, j'y poursuivis, à partir de 1983, mes recherches antérieures sur ce que j'avais alors appelé dès 1981 aux Assises Nationales de la Recherche « les Bétons à Hautes Performances » (BHP, en anglais HPC). Ces recherches dans mon équipe allaient se faire, avec des contributions extérieures déterminantes des leaders de la « physique molle » (notamment Pierre-Gilles de GENNES, Prix Nobel, et Etienne GUYON, bientôt directeur de l'ENS d'ULM). J'avais en parallèle la charge, sur le sujet des « nouveaux bétons », du montage puis du pilotage d'un Projet National de R. et D. lancé par les Ministères de la Recherche et de l'Équipement. Ce projet regroupait une vingtaine de laboratoires de recherche publics ou privés, quelques grands laboratoires étrangers et une vingtaine d'entreprises sur ce thème des « nouveaux bétons ». En huit ans, il a conduit à une cinquantaine de thèses et de très nombreuses publications scientifiques et à un livre pour architectes et ingénieurs traduit en anglais, espagnol et chinois. Il fut aussi l'occasion de réaliser plusieurs (grands) ouvrages d'art expérimentaux scientifiquement très expérimentés, ouvrages d'art qui furent les efficaces moteurs de l'adaptation des réglementations nationales et internationales relatives à ces nouveaux matériaux.

Dès 1985, ces BHP devinrent opérationnels sur de très grands ouvrages (le premier au monde fut le pont de l'île de Ré puis les viaducs de Sylans (A 40) et bientôt l'Arche de la Défense. En 1988, grâce à une approche scientifique toujours pluridisciplinaire associant physique, chimie, mécanique, biologie et géologie, et grâce à une implication forte des Services R. et D. de trois grandes entreprises françaises, Bouygues, Lafarge et Rhodia, nous sommes arrivés à la maturité d'une troisième génération de béton, les BPR bientôt appelés les BFUP (Bétons de Fibres Ultra Performants).

En 1988, l'école doctorale internationale sur les « nouveaux matériaux de construction » que j'avais montée associait l'ENS de Cachan et l'École des Ponts et Chaussées, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et les Universités de Liège, Laval-Québec et Sherbrooke. Je proposais, en 1991, pour le site universitaire de l'ENS de Cachan dont j'étais directeur, la construction d'une passerelle en BFUP qui aurait été la première réalisation mondiale faite avec ce matériau.

Refusé par l'administration, le projet, déjà complètement étudié, fut finalement construit quasi tel quel, peu d'années plus tard, à Sherbrooke, proposé par l'Université locale partenaire de notre l'école doctorale. Derrière ce premier ouvrage au monde en BFUP, Rudy RICCIOTTI fut le premier architecte à intégrer dans une remarquable approche systémique toutes les propriétés de ce matériau en érigeant à Séoul la passerelle de la Paix. L'entrée dans le XXIème siècle vit se multiplier les applications en grands ouvrages emblématiques car souvent phares de la culture (nombreux musées et salles de concert en Europe) ou phares de la rénovation de quartiers urbains en friche ou quasi friche (MUCEM à Marseille), applications toutes conduites par de très grands architectes.

Marchant résolument et avec respect dans l'axe tracé par Henri DENEUX à Reims, je rappelle aussi quelques éléments technologiques propres au BFUP.

- 1 - Sa résistance à la compression (160 à 400 MPa suivant la composition choisie) est 6 à 15 fois supérieure à celle du béton utilisé à Reims (25 à 30 MPa) et 2 à 4 fois plus résistant que de très bons BHP (90 à 100 MPa). Par ailleurs son rapport légèreté-résistance est particulièrement opportun dans un projet où il faut impérativement réduire les charges sur les murs verticaux.
- 2 - Grâce à l'emploi de micro fibres ultra fines de différentes natures dans sa composition, le BFUP a une résistance en traction qui n'est plus négligeable au contraire de celles des bétons des générations précédentes. Elle est même égale ou supérieure à la résistance en compression des

bétons classiques ce qui permet de construire SANS les armatures métalliques jusqu'alors obligatoires mais toujours fragilisantes en cas d'incendie de forte intensité notamment.

- 3 - La mesure de la porosité aux gaz de tous les matériaux obtenus par hydratation de poudres - c'est le cas des bétons - est un moyen essentiel pour évaluer la durabilité dans le temps de ces matériaux et, entre autres, leur résistance à des agressions extrêmes. Retenons que cette porosité aux gaz est dans le rapport de 1 à 10 000 avec celle des bons bétons traditionnels. La perte de sensibilité aux agressions externes (pollutions chimiques venues d'environnements agressifs, chocs thermiques,..) et aux évolutions internes (fluage, retrait hydrique, carbonatation,...), est assurée et fait de ce matériau une véritable céramique industrielle de construction à très haute durabilité.
- 4 - Une autre propriété remarquable est la singulière rhéologie de ce nouveau matériau jointe à une exceptionnelle thixotropie. Ensemble, elles confèrent ainsi à ces bétons, liquides à leur fabrication et durant leur mise en place dans le coffrage, des propriétés de fluidité et de conservation de l'homogénéité nécessaires à leurs futures qualités de résistance et de surface.

Les deux pièces que je vous fais circuler, déjà vieilles de vingt ans, montrent mieux que tous discours la très grande proximité entre les BFUP et les céramiques sur la facilité d'obtention de formes singulières, sur leur micro-géométrie de surface, ou encore sur leur capacité à imiter, en vues lointaine ou proche, les couleurs et les aspérités éventuellement désirées en surface.

Un autre point est important en phase de travaux. A la condition de faire appel à la quinzaine d'entreprises et bureaux d'études français très qualifiés par de nombreuses références, la fabrication de ce matériau, la mise en œuvre d'éléments en usine de préfabrication, la conception et le calcul de grandes structures, charpentes, ponts, coupoles, autres types d'ouvrages d'art, sont, en France, parfaitement maîtrisés. Les références de réalisations sont désormais nombreuses notamment dans le domaine de la Culture, dans de nombreux autres pays aussi.

Ceci introduit, pour conclure, une remarque d'une autre nature mais à laquelle je suis profondément attaché, a fortiori dans le cas de NOTRE-DAME : le béton BFUP est une invention française mariant public-privé au plan scientifique et, saluons le parce que ce n'est pas toujours la force de notre Pays, au plan de l'application technologique des résultats scientifiques aussi. Il y a 25 ans, les premières réalisations ont été renvoyées au bout du monde, mais dans des pays eux aussi très industrialisés, par la frilosité et la lenteur d'adaptation de nos réglementations et de nos normes. Cependant déjà ces premières réalisations ont été conçues et construites par des architectes et ingénieurs français avec des composants issus de matériaux que nous avons en totalité sur notre territoire. Depuis cette époque de naissance, les règlements et normes sont enfin à jour et les réalisations en France sont nombreuses.

Il serait donc heureux que la rénovation de NOTRE-DAME soit aussi l'occasion de défendre aux yeux de millions d'observateurs du Monde entier, la capacité de la France à associer, sur un thème par essence Culturel et Patrimonial, le fruit de découvertes désormais validées d'équipes pluridisciplinaires très attachées à la Science, à la Technologie et à la promotion d'Innovations maîtrisées et durables, innovations restant à l'écart des défauts du bois (incendie, poids, approvisionnement) et du plomb (incendie et pollutions).

Je vous remercie de votre attention.