

**Christian Morel**

## **LES JEUX DELICATS DU PRINCIPE DE SOLIDITE**

**Gérer et Comprendre-ANNALES DES MINES**  
**Mars 1996 . Numéro 43**

L'article d'Hervé Dumez (G&C N°43) sur la construction de la cathédrale de Milan est instructif à un double titre. D'abord parcequ'il nous présente un exemple riche et original de rapports entre théorie et pratique.

Mais aussi parcequ'il aborde, à travers l'édification d'une oeuvre architecturale, la conception de produits économiques qui présentent la particularité de posséder à la fois une forte dimension esthétique et une forte dimension technique. Ces produits tiennent une place importante dans les économies contemporaines : les oeuvres architecturales de toute nature qui occupent une part croissante de la surface terrestre, les véhicules et beaucoup de produits moins volumineux à contenu technique et à contrainte esthétique élevés. L'exemple de la cathédrale de Milan nous renseigne sur la façon dont s'effectuent les arbitrages et les compromis entre l'esthétique et la technique dans des artefacts de ce type. Plus précisément, dans le domaine des produits architecturaux, la demande est en même temps une attente de solidité et une attente esthétique. Il est intéressant d'examiner comment ces deux attentes sont conciliées. Dans d'autres produits à fort contenu technique et esthétique, l'attente technique principale ne sera pas la solidité mais par exemple la vitesse ou la puissance, à associer à l'attente esthétique. La problématique de prise en compte de ces deux attentes n'est probablement pas fondamentalement différente de celle qu'on trouve dans la conception architecturale.

Ces deux questions posées directement ou indirectement par Hervé Dumez ont suscité ces quelques réflexions complémentaires.

### **Dimensions technique et culturelle du débat esthétique**

La résistance des milanais aux propositions gothiques ne s'appuyait certainement pas uniquement sur des considérations techniques. Elle prenait sa source dans la culture classique des italiens. Ils voyaient le gothique comme un art étranger et barbare. Héritiers du classicisme antique, ils se considéraient comme les derniers représentants de l'élégance authentique. *" Alors qu'en général le gothique aspire à l'élévation, en Italie, il est bas et spacieux. Profondément influencé par la survivance des formes de l'antiquité romaine, l'art italien n'a jamais pu admettre les extensions en longueur et en hauteur des édifices médiévaux ni leur angularité. Le dôme, rejeté ailleurs, est conservé ici, et, à l'extérieur, la couleur remplace dans une large mesure le jeu de la lumière sur les reliefs sculptés. (1)".*

Cette divergence esthétique comprenait une dimension religieuse. Dans les petites églises romanes issues des formes de l'antiquité classique, la prière se déroule dans l'obscurité et dans l'austérité. Dans la cathédrale gothique, le fidèle prie, immergé dans la lumière qui pénètre en abondance et dans l'opulence de la statuaire et du décor (2). C'est, pour les italiens une rupture aussi difficile à accepter que, pour des catholiques traditionalistes, l'abandon du latin.

Pourquoi cette divergence esthétique entre les milanais et les conseillers français s'est-elle traduite par un débat technique? Selon moi **le conflit technique a servi d'exutoire vis à vis du conflit esthétique**. En effet, dans un désaccord esthétique, il est extrêmement difficile pour les adversaires d'explicitier ce désaccord. Pour un milanais, comment expliquer que l'architecture gothique le choque profondément. Pour un français, comment dire que le classicisme architectural est artistiquement rétrograde. Dans l'impossibilité de dialoguer sur ce registre, les rivaux se sont affrontés sur le registre technique, plus facile à manier, et plus précisément sur le terrain de la solidité, référence plus légitime que le besoin d'austérité ou d'élévation.

On peut observer un mouvement similaire dans l'architecture contemporaine. Lors de l'édification des premiers gratte-ciel, les craintes qui se sont manifestées sur la sécurité étaient certainement aussi une façon d'exprimer le choc esthétique. Les doutes fréquemment exprimés sur la capacité structurelle du centre Georges Pompidou à être correctement entretenu ou sur la sécurité de la pyramide du Louvre ne sont-ils pas une façon d'exprimer, derrière des considérations techniques, une forte réticence esthétique difficile à avouer ?

Le design industriel est un domaine où les différends esthétiques peuvent être exprimés sous la forme de débats techniques. Par exemple, en design automobile, on connaît, chez les consommateurs, des partisans des formes anguleuses, des partisans du bio-design aux contours en "motte de beurre" et des partisans du style arrondi-tendu avec des lignes ou des plis qui enlèvent la mollesse suggérée par les courbes. Le débat entre ces différentes tendances s'exprime rarement sur le plan esthétique. Il se manifeste à travers des échanges d'avis techniques. Certains justifieront le style anguleux par la protection accrue des passagers induite, selon eux, par cette structure de tank ou de forteresse (or ce n'est pas cela qui augmente la sécurité). Les partisans du bio-design et ceux de la courbe tendue s'affronteront sur le terrain du meilleur coefficient de pénétration dans l'air ( $C_x$ ).

## **Les enseignements de la cathédrale de Beauvais**

Le professeur d'architecture Mario Salvadori a publié un ouvrage remarquable sur les phénomènes de structure (3). Il consacre un chapitre fort instructif sur les déboires de la cathédrale de Beauvais. On peut identifier trois phases.

La première est l'achèvement du chœur et du chevet en 1272 et l'effondrement des voûtes principales du chœur en 1284. De nombreuses recherches scientifiques ont été menées pour trouver les causes de cette catastrophe mais le mystère reste entier. On n'a décelé aucune faute de structure, aucun défaut de maçonnerie. Des hypothèses comme un effet multiplicateur du vent à tel endroit ont dû être éliminées. Selon Mario Salvadori, l'effondrement provient d'un facteur mineur inconnu.

La deuxième phase est la reconstruction du chœur, terminée en 1337. Le Maître qui en fut chargé, conservateur et prudent, attribua à tort l'éboulement à une fragilité

excessive et ajouta des renforts. Il intercala, entre les pieds-droits principaux, des pieds-droits intermédiaires et construisit des piliers extérieurs et arcs-boutants supplémentaires. Cela atténua considérablement le caractère élancé et lumineux de l'édifice, qui initialement faisait de cette cathédrale le chef d'oeuvre du gothique classique.

Enfin, dans la deuxième moitié du seizième siècle, une tour en pierre fut construite au dessus de la croisée. Il est évident aujourd'hui qu'elle était trop haute et trop lourde pour la structure qui la portait et la contenait à sa base. En 1577, le jour de l'Ascension fut un jour de chute : elle s'effondra (juste après qu'une procession célébrant l'Ascension ai quitté la cathédrale).

Que nous enseignent ces péripéties?

- D'abord que l'effondrement d'un édifice ancien ne signifie pas nécessairement qu'il était mal construit. La seconde catastrophe de Beauvais provenait d'une erreur manifeste alors que la première ne peut s'expliquer par aucune faute. L'effondrement de la cathédrale de Milan n'aurait peut-être pas permis de départager nettement les adversaires.
- Ensuite nous observons cette inclination à la prudence dans la deuxième phase qui conduit à renforcer un édifice sans que cela soit nécessaire, avec un effet négatif sur l'esthétique. Nous retrouverons plus loin dans d'autres exemples cette association : renfort utile du point de vue technique de l'époque, inutile du point de vue technique actuel, fort sentiment induit de solidité, effet esthétique néfaste.
- En troisième lieu, selon Mario Salvadori, les responsables du deuxième éboulement (celui de la tour) sont à la fois et les corporations qui avaient perdu un savoir-faire et les maîtres et conseillers dont la science s'était dégradée. Autrement dit les praticiens et les théoriciens ont été complices dans cette catastrophe. Nous retrouverons plus loin un cas où, loin de s'affronter, théoriciens et praticiens se sont rejoints dans l'erreur (cas des contreforts aval des ponts d'autrefois, inutiles et néfastes, mais plébiscités et par les praticiens et par les théoriciens).

## **Complexité des relations entre solidité, technologie et esthétique**

Comme le montre bien le cas de la cathédrale de Milan, les relations entre le principe de solidité, l'art et la science sont complexes. D'autres exemples très différents confirment cette complexité. Considérons cinq exemples :

- **les avant-becs circulaires des ponts avant le XVIII<sup>e</sup> siècle (4)**. Dès la période précédant le temps des ingénieurs, les piles des ponts étaient dotées, du côté amont, d'avant-becs afin de créer un rétrécissement progressif du

courant entre les piles. Leur rôle était de contribuer à la solidité du pont en réduisant les tourbillons susceptibles de provoquer un affouillement aux angles amont des piles. La plupart des avant-becs étaient de plan triangulaire. Mais est apparu un mouvement de théoriciens et d'architectes en faveur d'avant-becs de plan circulaire. Par exemple en 1500 l'architecte italien Joconde tente d'imposer, avec l'appui du gouverneur de Paris, des avant-becs circulaires au pont Notre-Dame de Paris, "*mais se heurte à son compétiteur français Didier de Félin, qui parviendra à imposer des triangles plus classiques.*" (5). Or le plan circulaire était d'un point de vue technique une erreur car "*il s'oppose à la logique de l'écoulement*" (6), alors que le plan triangulaire était adapté. Ce qui est important de noter ici est que le plan circulaire néfaste a été défendu par ceux qu'Hervé Dumez appellerait les scientifiques alors qu'il semble que les maîtres d'oeuvre (les praticiens) s'en méfiaient considérablement.

- **Les contreforts des ponts coté aval (7).** La conception traditionnelle des ponts comprenait une habitude curieuse : celle de construire des contreforts de section rectangulaire du coté aval contre les piles. L'objectif était, non de faciliter la sortie du courant passant entre les piles, mais de renforcer le pont lui-même. Mais ces contreforts, au lieu de renforcer le pont, le fragilisaient. En effet, "*l'instabilité du pont dans le sens du courant n'est pas due à un problème de poussée interne ou externe qui pourrait être combattue par des contreforts, mais bien à un problème d'affouillement des fondations qui ne peut qu'empirer si l'on prolonge la réduction du débouché.*(8)". On a là un exemple remarquable de pratique architecturale fondée sur le bon sens et la théorie de l'époque et aboutissant à l'effet inverse de celui recherché.
- **Les arcs de la tour Eiffel.** La tour Eiffel a été dotée, sur chacune de ses quatre faces, d'un arc qui va d'un pied à l'autre en passant tangentiellement par le premier étage. Ces arcs ne répondent à aucune nécessité structurelle. La tour serait suffisamment solide sans eux, mais aurait donné l'impression d'être fragile (9). On lui a donc ajouté ces arcs qui, par leur référence classique, le lien apparent qu'ils établissent entre les pieds et le remplissage qu'ils forment, apportent une image de solidité.
- **L'écusson du pont Mirabeau.** Le pont Mirabeau à Paris est un pont cantilever. Cela signifie qu'il est constitué de porte-à-faux qui s'équilibrent mutuellement. Il est formé, en allant d'une rive à l'autre, d'un demi arc du quai à la première pile, puis d'un arc central de la première à la deuxième pile et enfin d'un demi arc de la deuxième pile au quai. Chaque demi arc contrebalance la moitié de l'arc central. La conséquence visuelle de ce système est l'extrême finesse du sommet de l'arc central (à l'endroit où il est tangent au tablier) puisque la solidité ne vient pas de l'arc lui-même. Le viaduc de Tanus sur le Viaur (ligne de Rodez à Albi) (10), pont cantilever, illustre parfaitement ce phénomène : l'épaisseur du sommet de l'arc central, sur une distance d'un mètre, est presque égale à l'épaisseur des rails eux-mêmes. S'agissant du pont Mirabeau, on a considéré que cette finesse pouvait induire chez l'utilisateur ou

l'observateur une impression de fragilité excessive et on a décidé d'accrocher au sommet de l'arc central, sur chaque face, un gros écusson en bronze qui masque sa finesse à cet endroit.

- **La structure cubique de la "prairie box"**. Au début du XXe siècle, aux Etats-Unis, un type de maison individuelle a connu un succès extraordinaire : la maison de deux étages, à base carré et à toit pyramidal peu pentu. Les petites cités et la campagne américaines se sont remplies de ces boîtes de la prairie, encore appelées "the foursquare", "the plain house", "the classic box", "the double cube" (11). L'impression de force, de solidité, de stabilité que cette structure dégageait explique cet engouement. Cette réaction était toute subjective car ces maisons étaient de toute façon en bois comme la plupart des autres types de maisons individuelles aux Etats-Unis et n'étaient ni plus ni moins solides.
- **Les diagonales croisées du gratte-ciel John Hancock à Chicago (12)**. Tout gratte-ciel doit posséder un système de contreventement qui lui donne sa rigidité verticale. A l'origine des gratte-ciel, le contreventement était assuré par les murs. Puis fut introduite la technique du noyau central permettant une structure apparente très légère. Le John Hancock Building, de construction relativement récente, est à cet égard original car le contreventement y est assuré par une cage externe apparente, comportant notamment sur chaque face dix diagonales croisées qui renforcent l'édifice vis à vis des vents forts et fréquents de la windy city. Les façades sont ainsi parcourues de X monumentaux, nous ramenant d'une certaine façon à l'âge des premiers gratte-ciel dont la structure trapue et épaisse rendait évident et apparent le système de contreventement (ou à l'âge des cathédrales gothiques rejetant à l'extérieur leur système structurel sous la forme des arcs boutants). Ces diagonales qu'on pourrait juger disgracieuses sont, semble-t-il, relativement appréciées, aussi bien du public que de la critique architecturale, comme le montre cette anecdote. A chaque étage, deux fenêtres sont traversées par une diagonale. Un agent immobilier est parvenu à louer plus cher les appartements et bureaux dont les fenêtres sont ainsi partiellement obstruées.

On peut caractériser et comparer ces différents cas en fonction des variables : origine de la décision, point de vue technique de l'époque, point de vue technique actuel, sentiment induit de solidité (chez l'observateur ou l'utilisateur), conséquence esthétique (selon nous), effet marketing (c'est à dire satisfaction du client observateur ou utilisateur). Ce qui nous donne le tableau suivant :

<b>Elément relatif à la solidité</b>	<b>Origine</b>	<b>Point de vue technique de l'époque</b>	<b>Point de vue technique actuel</b>	<b>Sentiment induit de solidité</b>	<b>Effet esthétique</b>	<b>Effet marketing</b>
<i>Avant-bec circulaire des ponts</i>	théorie	utile	néfaste	fort	positif	bon
<i>Contrefort aval des ponts</i>	théorie et sens commun	très utile	très néfaste	très fort	néfaste	bon
<i>Renforcer les piliers de la cathédrale de Milan</i>	théorie	utile	inutile (l'édifice a tenu plusieurs siècles)	fort	néfaste	mauvais (selon les milanais)
<i>Arc de la tour Eiffel</i>	sens commun	inutile	inutile	fort	néfaste (perte de finesse)	bon
<i>Écusson du pont Mirabeau</i>	sens commun	inutile	inutile	fort	néfaste (perte de finesse)	bon
<i>Structure cubique de la "prairie box"</i>	sens commun	peu utile	peu utile	très fort	néfaste (lourdeur)	excellent
<i>Diagonale du John Hancock building</i>	théorie		très utile	fort	néfaste	bon

Que peut-on tirer de cette confrontation d'exemples ?

- On observe d'abord, dans quatre cas, un fort sentiment induit de solidité alors que le renfort est soit inutile (arc de la tour Eiffel, écusson du pont Mirabeau), soit néfaste pour la solidité (avant-bec circulaire, contrefort aval des ponts traditionnels). Cela met en relief toute l'importance de la solidité perçue, fort éloignée de la solidité réelle.
- Dans un cas (contrefort aval des ponts), science de l'époque et sens commun sont complices dans l'erreur. Théorie et pragmatisme peuvent se tromper ensemble.
- Dans deux cas (arc de la tour Eiffel, avant-bec circulaire des ponts traditionnels), le sentiment de solidité découle d'une harmonie des formes, d'un accord visuel, d'une élégance des lignes. La courbe de l'arc et de l'avant-bec apporte une sensation de plénitude et de continuité. Elle

relie les pieds de la tour. Elle évite la rupture de ligne qu'on trouve sur les avant-becs en pointe. De plus elle rappelle la voûte classique. Une musique harmonieuse induit un sentiment de sécurité alors que des sons discordants, dans un registre peu familier, provoque l'inquiétude. On retrouve ici le débat sur la construction de la cathédrale de Milan. Les milanais, plongés dans la culture classique, jugeaient discordante la musique gothique des formes architecturales.

- Dans deux cas (arc de la tour Eiffel, écusson du pont Mirabeau), la science s'est effacée devant le sens commun. Elle a dû ajouter des éléments inutiles pour donner une impression de solidité à l'observateur. La science permet une finesse telle qu'elle doit y renoncer, comme des ingénieurs gothiques qui réduiraient la hauteur de l'édifice pour rassurer des clients italiens classiques. L'architecture, en devenant scientifique, ouvre un univers de formes qui inquiète le sens commun : envolées gothiques, dentelles des structures métalliques, élévation vertigineuse des gratte-ciel, porte-à-faux immenses des couvertures en béton, ponts suspendus à des haubans.
- Dans cinq cas (arc de la tour Eiffel, écusson du pont Mirabeau, contrefort aval des ponts, structure cubique de la "prairie box", diagonale du John Hancock building), l'effet esthétique et l'effet marketing divergent. Les arcs dégradent le caractère élancé de la tour Eiffel. Les écussons jurent, comme des pièces rapportées, sur le pont Mirabeau. Les contreforts aval des ponts forment de disgracieux appendices. La forme carrée de la maison américaine lui donne l'allure d'une boîte qui lui a donné son surnom. Les immenses poutres qui parcourent les façades du gratte-ciel John Hancock alourdissent l'édifice. Mais le public apprécie tous ces éléments qui apportent ou favorisent une forte impression de solidité. Le succès de la poutre apparente, la suppression du crépis pour rendre visibles les pierres des murs ne sont pas seulement des modes esthétiques. C'est une façon de faire ressortir la structure et de donner une impression de solidité. Dans cet art qu'est l'architecture, le sentiment de force intervient considérablement dans le débat esthétique. En revanche, en peinture la légèreté d'un coup de pinceau, ou en musique la faiblesse d'une note, ne seront pas contestées en se référant au principe de solidité. Le débat sera plus purement esthétique.

\* \* \*

Je conclurai ces réflexions sur deux idées. La première est que l'exemple de la cathédrale de Milan et d'autres cas confirment la subtilité des relations entre pratique et théorie, art et science. Praticiens et théoriciens peuvent être complices dans l'erreur



(construction de la tour de la cathédrale de Beauvais, contreforts aval des ponts anciens). Il peut être impossible de déterminer qui avait raison (voir le premier effondrement de la cathédrale de Beauvais). Parfois même on ne sait plus très bien qui est l'artiste et qui est le scientifique. Les partisans des avant-becs circulaires étaient, en tant qu'architectes, des "scientifiques". Mais leur attachement à la forme arrondie était une attitude d'artiste. De leur côté, les adversaires de cette forme étaient des hommes de terrain. Mais leur conviction était fondée sur les faits observés, ce qui n'est rien d'autre qu'une démarche scientifique.

La deuxième idée est que l'image technique d'un produit et son image esthétique sont intimement mêlées. Le beau peut donner l'illusion d'un contenu technique. L'arc de la tour Eiffel et la courbe de l'avant-bec de ponts anciens, grâce à leur harmonie, suscitent sans raison un sentiment de solidité. Et inversement un contenu technique lisible peut créer un plaisir esthétique. Le gratte-ciel John Hancock, en affichant sa structure, produit un élan esthétique chez les architectes et les clients. Cette imbrication de l'art et de la science joue un rôle essentiel dans les processus de design. Pour la plupart, ceux-ci se situent entre le "tout esthétique" (la technique est invisible derrière le décor) et le "tout technique" (le contenu technique est volontairement laissé apparent).

Dans la conception architecturale et dans le design, art et science sont indissociables. Peut-être est-ce un des sens de "Ars sine scientia nihil est"?

## NOTES

- (1) J. Harvey. "L'Art des bâtisseurs. L'essor de l'architecture". p 92. in : M. Brion, dir. Splendeur et rayonnement du Moyen-Age. Pygmalion.
- (2) M. Salvadori. L'architecture des pyramides aux gratte-ciel. Pygmalion.. pp 199-200.
- (3) M. Salvadori. Op. cit. pp 198-217.
- (4) Ces observations sont tirées de : J Mesqui. Le pont en France avant le temps des ingénieurs. Picard. pp 196 à 198.
- (5) Op. cit. p 197.
- (6) Op. cit. p 197.
- (7) Ces observations sont tirées de : J. Mesqui. Op. cit. p 198 à 200.
- (8) Op. cit. p 200.
- (9) Cette observation est tirée de : M Salvadori. Op. cit. p 126.
- (10) Ce pont est cité et sa photo figure dans : S Dewarte et B Lemoine. L'architecture et les ingénieurs. Moniteur. p 96.
- (11) A. Gowans. The Comfortable House. North American Suburban Architecture. 1890-1930. MIT. pp 84-93. et V. and L. Mcalester. A Field Guide to American Houses. A. A. Knopf. pp 438-447.
- (12) Cette observation est tirée de : M Salvadori. Op. cit. pp 106-115.