

PIERRE-YVES OLLIVIER

LA CONCEPTION DES STRUCTURES

Matériaux, dimensionnement et aspects constructifs

DUNOD

Maquette de couverture et maquette intérieure : Maud Warg

Photographie de couverture : © Cybèle - visites insolites à Lyon
Gare de Lyon-Saint-Exupéry
architecte Santiago Calatrava Valls

© Dunod, 2017
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-076699-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

6	Avant-propos
8	1 ■ L'art de construire
10	Sémantique au service de l'art de construire
15	Éthique : le respect de la nature, de la vie et de la culture
18	Histoire des constructions : conception, réalisation et usages
22	2 ■ Formes géométriques des structures
25	Des droites et des courbes
50	Des surfaces planes et courbes
56	Des volumes
58	3 ■ Les matériaux : caractéristiques et sections
59	Propriétés générales
71	Les roches
73	La terre (crue et cuite)
74	Le bois
79	L'acier, les câbles et l'aluminium
87	Le béton
96	Membranes
102	4 ■ Modélisation
103	À la main ou à l'ordinateur ?
105	Les éléments de la modélisation
114	5 ■ Analyse statique
117	Types de sollicitations
121	Degré d'hyperstatisme
123	Principes et méthodes de résolution
129	Structures isostatiques

135	Structures hyperstatiques	
141	Cas des structures en treillis	
142	Un mot sur l'analyse dynamique	
144	6 ■ Dimensionnement	
145	Vérification de la stabilité	
149	Description des contraintes	
154	Vérification de la résistance	
158	Vérification des déformations	
160	7 ■ Aspects constructifs	
162	Conception, construction, maintenance : quel(s) lien(s) ?	5
163	Fondations	
165	Murs de soutènement et renforcement de sol	
165	Fabrication des éléments	
167	Montage	
169	Entretien, maintenance	
171	Ressources	
175	Glossaire	
180	Bibliographie	
182	Notes	
186	Index	
192	Crédits photographiques	

AVANT-PROPOS



Cet ouvrage veut faire un tour d'horizon de ce qui a été construit et tente de définir un langage simple pour le plus grand nombre, au service de l'art de construire : histoire, besoins, matériaux, phases, techniques, concepts et tout autre élément qui le constitue. Je pense en effet que les mots employés nous incitent, soit à refaire toujours les mêmes choses, soit à innover en les revisitant, en les questionnant, en revenant aux principes fondateurs de la science des structures et des matériaux.

C'est en ce sens par exemple qu'ici est détaillé le processus itératif de la conception des structures en six activités distinctes, qui se répondent les unes aux autres (pour affiner, corriger ou vérifier) : choix des formes, des matériaux, modélisation, analyses statique et dynamique, dimensionnement, prise en compte des aspects constructifs.

Volontairement axé sur la phase de conception, cet ouvrage est principalement à destination des étudiants et des professionnels de la construction, qu'ils soient architectes, ingénieurs ou bien encore maîtres d'ouvrage, mais aussi à tous ceux qui veulent comprendre comment les structures sont conçues, comment les forces agissent sur elles et quels sont les matériaux, les formes et les dimensions avec lesquels tout concepteur travaille, aussi bien par le passé qu'aujourd'hui, ici et ailleurs.

Au-delà de l'aspect technique et normatif, il veut surtout faire ressortir l'élégance des structures, et par suite, des constructions elles-mêmes, et veut susciter à travers elle l'envie de comprendre encore mieux les contraintes à dompter ou contourner pour réaliser une structure, ainsi que les progrès acquis au fil des siècles en matière de sciences des structures et des matériaux. Ce livre veut aussi mettre en avant la nécessaire vision globale à avoir lorsqu'on veut contribuer à l'acte de construire : ce qui était fait à l'époque par une seule personne est maintenant séparé en un tas de spécialités, toutes plus utiles les unes que les autres, mais qui peuvent devenir contre-productives dès lors qu'elles ne s'intéressent pas aux autres.

Enfin, ce livre s'intéresse particulièrement aux structures de grande taille car elles nécessitent souvent, plus que les constructions de petite taille, un usage optimal des matériaux et donc une compréhension fine des comportements structurels, pour des raisons de coût, mais aussi de délais et tout simplement de faisabilité : le surcoût des études sera en effet compensé par les gains faits en quantités de matériaux, alors que le surcoût d'études pour une maison ne sera pas absorbé par la faible quantité de matériaux économisée (à moins de réaliser des maisons en série).

Néanmoins, les petits ouvrages, que ce soit des ponts ou des bâtiments, reposent sur les mêmes principes, et à une époque où le nomadisme est de mise, une maison avec des poutres en treillis (en acier, voire en aluminium), même pour des faibles portées d'environ 4-5 m, peut s'avérer pratique : cet élément sera en effet bien plus léger à déplacer par la suite qu'une poutre en béton (ce qui est déjà un peu le cas avec les poutres à triple treillis utilisées au-dessus des scènes de musique par exemple, pour installer des éclairages ou des systèmes de sonorisation temporaires). D'autre part, des créations architecturales audacieuses peuvent émerger lorsque les tailles sont réduites et le comportement structural peu contraignant : un porte-à-faux, bien que structurellement gourmand en matériau, reste envisageable pour un balcon, mais pas pour un bâtiment (bien que des contre-exemples existent). Mais ce serait l'objet d'un autre livre...

■ REMERCIEMENTS

Ce livre n'aurait jamais existé sans les Éditions Dunod et je tiens ici à les remercier, en particulier Ronite Tubiana et Florian Boudinot.

Par ailleurs, j'ai pu bénéficier d'un environnement de travail bienveillant et productif au sein de l'espace de coworking La Chapelle à Nantes. J'ai pu y confronter bon nombre d'idées avec l'avis des coworkers et ainsi améliorer le rendu final du livre. Que soit aussi ici remerciée l'AFGC (Association française de génie civil), dont les informations sur les matériaux « câbles » et « BFUP » (béton à ultra haute performance) m'ont été particulièrement précieuses.

Mon idée de livre a germé au fil des ans et tous mes projets professionnels depuis 2008 ont apporté, d'une manière ou d'une autre, de la matière à ce livre : merci à tous mes partenaires de travail, et particulièrement aux antennes allemande et française du bureau d'études Schlaich Berghmann und Partner.

Merci à ma famille de m'avoir transmis le goût de l'écrit et de m'y avoir donné accès de manière simple et sincère, dans la joie comme dans la tristesse.

Enfin, écrire un livre est une activité si particulière qu'elle nécessite, pour un homme marié et papa d'une petite fille, une grande chance : celle d'être épaulé par sa femme et sa fille, Manon et Annaïg. Merci à toutes les deux de m'avoir accompagné dans cette première belle aventure dans le monde des livres, ces objets que vous avez si joyeusement renommés « mes copains ».

1

L'ART DE CONSTRUIRE

« L'élégance, c'est quand l'intérieur
est aussi beau que l'extérieur. »

COCO CHANEL

« Il est très facile de casser et de détruire.
Les héros, ce sont ceux qui font la paix et qui bâtissent. »

NELSON MANDELA

Panthéon de Rome : vue intérieure du dôme en béton de 43 mètres de diamètre avec ses caissons et son oculus central de 8,7 mètres de diamètre laissant passer la lumière du jour.



L'art de construire, c'est le soin apporté à une construction.

On parle de construire «selon les règles de l'art», tant dans la conception que dans la réalisation : « Les règles de l'art sont celles qui correspondent à l'état de la technique au moment de la réalisation de l'ouvrage ou de la prestation. Ces règles se composent d'un ensemble de pratiques professionnelles à respecter qui sont spécifiques à chaque domaine afin que les ouvrages ou les prestations soient correctement réalisés.

« Il n'existe pas de règle générale pour définir les règles de l'art et ces règles sont très variées car elles n'ont pas une définition figée donc récurrente. Le juge considère que les règles de l'art sont des obligations implicites et leur non-respect constitue une faute de nature à engager la responsabilité contractuelle de leur auteur.¹ »

Il est donc vain de «figer» l'art de construire. Il est fluctuant, à l'image d'un pays, qui doit sans cesse renouveler les modalités de « l'art du vivre ensemble ». L'art de construire est donc plutôt un état d'esprit, qui se traduit ensuite, dans le temps et dans l'espace, par des productions remarquables. Il est clair que l'on ne refera pas des pyramides comme en Égypte, mais elles sont partie intégrante de l'art de construire : elles ont marqué leur temps, en bien ou en mal d'ailleurs.

La recherche, les avancées technologiques, mais aussi les visions de grands constructeurs (qu'ils soient techniciens ou politiques) ont contribué grandement au développement de l'art de construire. Ainsi des progrès scientifiques qui ont permis à partir du milieu du ^{xviii}^e siècle de calculer les structures et ainsi de les alléger, de les rendre plus variées. Mais il ne faut pas non plus oublier toutes les avancées qui ont été permises par de grands inventeurs avant cette période : les Romains avec leurs **arches**, qui ont donné par exemple le Pont du Gard, et leurs **coupoles**, comme celle du Panthéon à Rome, en Italie.

Comme l'écrivait Auguste Perret, un édifice sera intemporel dès lors qu'il s'éloignera des conditions humaines et passagères, c'est-à-dire, comme il les définissait lui-même, de sa destination, de sa fonction, de ses usages d'origine, des règlements et de la mode en vigueur lors de sa première exploitation. Cela ne doit pas faire oublier les autres conditions humaines et passagères, celles qui sont essentielles lors de la **conception** (les études) et de la **réalisation** (la phase chantier), et qui disparaissent des esprits, les bâtiments une fois construits. Les morts sur chantier sont par exemple oubliés ou ignorés, aussi bien pour la construction des pyramides égyptiennes que pour les cathédrales européennes ; la durée de construction aussi (des siècles parfois !). Ce souvenir nous est néanmoins rappelé avec des chantiers actuels, dans certains pays du monde, où les conditions de travail ne sont pas dignes des « règles de l'art ». Ce qui est à la fois malheureux (nous aimerions que cela n'existe plus) mais aussi heureux (cela nous permet de mettre le doigt sur ce qui doit être amélioré ou banni dans notre monde actuel, et par la même occasion

effectuer un état général des règles de l'art acceptables, ou qui doivent être respectées, partout dans le monde). Dans cette optique, les progrès ayant permis à la fois la réduction du nombre de morts sur chantier et la réduction du temps de construction sont inouïs et mériteraient d'être mis en valeur : ces progrès, malgré leur importance, sont et seront en effet invisibles aux générations futures qui regarderont les ouvrages d'autres siècles.

L'art de construire ne s'observe donc pas seulement : il s'étudie. Plus on regarde en arrière et plus on peut se projeter en avant. De même lorsqu'on prend de la hauteur, on peut aborder avec d'autant plus de sens et de perspicacité un travail en profondeur. L'art de construire se développera donc par observation, besoins concrets rencontrés sur le terrain, et aussi par étude des savoirs nécessairement historiques, qu'ils soient empiriques ou scientifiques.

SÉMANTIQUE AU SERVICE DE L'ART DE CONSTRUIRE

■ INTERROGER LES MOTS QUE L'ON EMPLOIE

10

L'art de construire mobilise un ensemble de pratiques, de méthodes, de savoirs, et tous ces besoins doivent être formulés de manière claire pour être compris et appropriés par le plus grand nombre. En ce sens, l'acte de construire n'est plus une spécialité, une compétence, mais un état d'esprit applicable par tous dans n'importe quelle entreprise humaine.

La complexité avec laquelle est abordé l'acte de construire dans nos sociétés occidentales et « développées », éloigne de plus en plus de gens de l'acte de construire, si ce n'est du « droit de construire ».

Remettre en valeur un langage clair sur l'acte de construire, afin que chacun puisse s'en emparer est très important. Le terme **résistance des matériaux** est par exemple obscur et peu souvent défini : un matériau ne résistera pas de la même façon si sa section a une forme creuse ou pleine, et si la forme de l'élément considéré est rectiligne ou courbe. Forme et résistance sont associées et les deux doivent s'étudier ensemble, avec un va-et-vient constant.

Un autre souhait est de voir se libérer, avec une nouvelle sémantique, tout un tas de réflexions et de pratiques innovantes. Dresser une carte générale des formes, des propriétés, de la disponibilité des matériaux, etc. : la connaissance des contraintes, loin de limiter la créativité, l'encourage et la développe. Encore faut-il connaître les contraintes... car si le béton semble accessible partout et dans tous les cas le matériau le plus économique, alors oui, nous n'aurons que des bâtiments en béton : est-ce de la liberté ou un automatisme ? Revenir à la source des besoins et bien comprendre l'enchaînement (et donc la pertinence