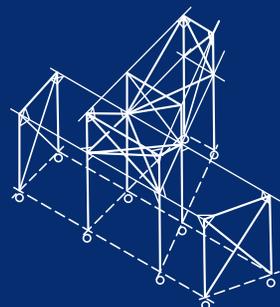
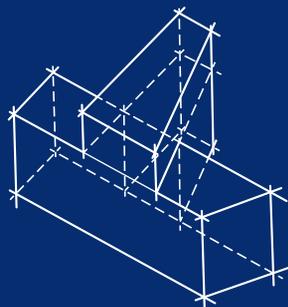
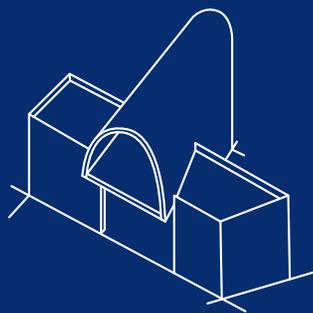
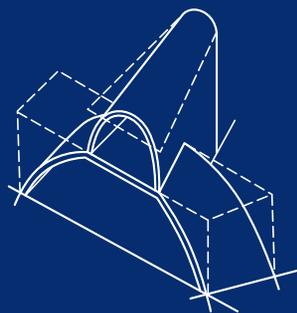
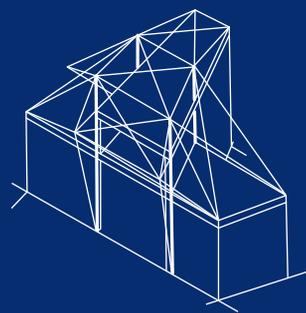
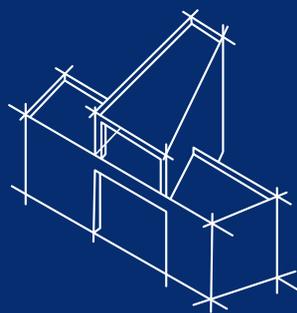


De la construction
à l'architecture

Alain Billard



LES STRUCTURES EN PORTIQUES



EYROLLES

Alain Billard

LES STRUCTURES EN PORTIQUES

Dans cet ouvrage novateur d'histoire des formes, l'architecture est expliquée par les impératifs de la construction, schémas, photos et dessins à l'appui.

Les édifices dont le système constructif est celui de structures en portiques figurent de longue date dans presque **toutes les familles d'ouvrages**: l'une, très courante, est celle des marchés de plein air et des manifestations éphémères. Une autre s'incarne dans les installations traditionnelles de production (ateliers d'artisans, petites fabriques, entrepôts ou bâtiments agricoles). Le monde de l'industrie et du commerce a engendré des manufactures et des marchés couverts, des serres et des halles d'exposition et aussi les bâtiments de transport — gares et aéroports — qui furent précédés par... les caravansérails. Le sport ne fait pas exception avec ses stades ou, plus modestement, les salles fermées et les piscines municipales. Du côté de l'enseignement, écoles, collèges, lycées et universités ont également adopté les structures en portiques, quoique plus tardivement. Après les immeubles de bureaux, les logements y viennent aussi à la faveur de panneaux d'habillage capables de gérer naturellement l'énergie, même si l'antériorité des colombages en avait ouvert la porte. Dans le domaine des ouvrages conçus pour traverser les siècles, là où les châteaux et palais n'avaient guère adopté les portiques que pour leurs galeries et leurs loggias, la plupart des édifices religieux témoignent de ce système constructif: temples de l'Antiquité et temples en bois des pays d'Asie, cathédrales et mosquées.

On a qualifié cette architecture de transparente, de légère — au sens esthétique du mot — **laissant voir du dedans vers le dehors et inversement**, car les murs se sont évidés pour laisser entrer la lumière, la nature puis la ville, et **les planchers sont devenus acteurs essentiels de la stabilité des bâtiments**.

SOMMAIRE

1. Les portiques de poteaux et de poutres: construire simplement ?
2. Les portiques de poteaux et de planchers: quand la poutre devient plancher
3. Les structures à noyau: concentrer les pressions sur un point de dissipation
4. Les portiques et les systèmes suspendus: une façon de libérer des espaces voulus vides

Architecte, enseignant à l'Ensap-Bordeaux (où il a fondé le DPEA « Risques naturels majeurs et architecture ») et à l'Ensa-Paris/Belleville (coresponsable du DSA « Architecture et risques majeurs »), **Alain Billard** — qui a reçu une formation d'ingénieur — est aussi docteur en archéologie; il a exercé un rôle d'expert ou de chargé de mission pour le compte du ministère de la Culture et celui de l'Environnement. Invité dans de nombreux colloques internationaux à traiter de l'enseignement de la construction et, par ailleurs, de la stabilité des bâtiments anciens, il est aussi l'auteur de deux manuels techniques (*Risque sismique et patrimoine bâti* et *Confortement du patrimoine bâti* coédités par Eyrolles et l'Afnor dans la prestigieuse collection « Eurocode »).

Du même auteur dans la même série:
Les structures-poids
Les structures de hautes performances

www.editions-eyrolles.com

DE LA
CONSTRUCTION
À L'ARCHITECTURE

Les structures en portiques

Alain Billard

DE LA
CONSTRUCTION
À L'ARCHITECTURE

Les structures en portiques

EYROLLES



Sauf mention contraire, les photographies et les schémas sont de l'auteur.
Droits réservés pour les autres illustrations.

Conception de la maquette : Page B
Mise en pages : GraphieProd/Jean-Louis Liennard
Relecture : Jean-Louis Liennard
Adaptation des schémas : Lionel Auvergne

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2016
ISBN Eyrolles : 978-2-212-13586-2

À mon professeur, Pierre Mathieu

À mes étudiants qui m'ont patiemment écouté

*«C'est très bien, monsieur l'Architecte! Vous sentez-vous capable de construire ce que vous avez dessiné? Les voûtes de la chapelle pourront-elles supporter le poids de la chapelle haute? Cette dernière, que vous prétendez close presque entièrement par d'immenses verrières historiées, peut-elle être concevable avec une maçonnerie de soutien si mince et si élancée?» (J. Diwo, *Le Printemps des cathédrales*, Flammarion, 2003, p. 318)*

Ainsi s'inquiétait le roi Louis IX auprès de Pierre de Montreuil en découvrant le projet de la Sainte-Chapelle. C'était en 1243.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
Introduction aux structures : L'invention constructive pour l'invention architecturale	1
Spécificités des structures en portiques	7
CHAPITRE 1. LES PORTIQUES DE POTEAUX ET DE POUTRES	
Construire simplement	12
1.1 Présentation	12
1.1.1 Naissance et évolution du concept de portique de poteaux et de poutres	13
1.1.2 Trois inventions pour contourner les lois de masse	14
1.1.3 Découverte du rôle des articulations	17
1.1.4 De la découverte de l'élasticité des matériaux à la gestion de la rigidité des structures	18
1.2 Naissance et invention d'une architecture de poteaux et de poutres	21
1.2.1 Découverte du premier principe élémentaire de stabilité sous l'action des charges verticales et horizontales, et réponse isostatique	21
1.2.2 Découverte du deuxième principe élémentaire de stabilité sous l'action des charges horizontales : la gestion des raideurs par les liaisons	23
1.2.3 Découverte du troisième principe élémentaire de stabilité sous l'action des charges de provenances diverses : la gestion des raideurs par l'élasticité des matériaux	29
1.3 Stabilité des ouvrages récents et contemporains en milieu isotrope	32
1.3.1 Déformations et conception des poteaux et des poutres, comportement sous les charges verticales	32
1.3.1.1 <i>Barycentre des masses ou centres de gravité à chaque niveau, et plan de sustentation</i> ...	32
1.3.1.2 <i>Les poteaux</i>	33
1.3.1.3 <i>Les poutres</i>	38
1.3.1.4 <i>Mode hyperstatique</i>	43
1.3.2 Déformations et conception des poteaux et des poutres, comportement sous les charges horizontales	44
1.3.2.1 <i>Mode isostatique</i>	45
1.3.2.2 <i>Mode hyperstatique</i>	46
1.3.2.3 <i>Quelques définitions pour le traitement architectural</i>	52
1.3.3 Démarche de conception constructive : de l'hyperstaticité à l'isostaticité	56
1.3.4 Liaisons des poteaux et des poutres	59
1.3.4.1 <i>Articulation en pied de poteau</i>	59
1.3.4.2 <i>Rotule ou articulation ?</i>	61

1.3.4.3	<i>Encastrement en pied de poteau</i>	65
1.3.4.4	<i>Articulation d'une poutre sur un poteau court</i>	66
1.3.4.5	<i>Articulation d'une poutre sur un poteau long</i>	68
1.3.4.6	<i>Encastrement d'une poutre dans un poteau</i>	70
1.3.4.7	<i>Articulation d'une poutre sur une poutre</i>	75
1.3.4.8	<i>Encastrement d'une poutre dans une poutre, dans un plan donné</i>	77
1.3.5	Contreventements et triangulation	78
1.3.5.1	<i>Des liaisons au contreventement des plans</i>	85
1.3.5.2	<i>Du contreventement des plans à la triangulation globale</i>	90
1.3.5.3	<i>Conception constructive et mise en œuvre technique des contreventements</i>	92
1.3.6	À propos des liaisons et de la triangulation	98
1.4	Prédimensionnement en milieu homogène	101
1.4.1	Données et premières conclusions	102
1.4.2	Vérifier la répartition des masses la mieux équilibrée par les descentes de charges	102
1.4.3	Réajuster le système constructif retenu	105
1.4.4	Vérifier par le calcul l'équilibre des charges prises en compte par les portants et les porteurs	105
1.4.4.1	<i>Première phase : calculs des inerties</i>	106
1.4.4.2	<i>Deuxième phase : prédimensionnement</i>	106
1.5	Épilogue	113
 CHAPITRE 2. LES STRUCTURES EN PORTIQUES DE POTEAUX ET DE PLANCHERS		
	Quand la poutre devient plancher	114
2.1	Présentation	115
2.1.1	Découverte n°1 : liaison rigide des poutres aux porteurs	118
2.1.2	Découverte n°2 : liaisons rigides ou articulées des planchers aux porteurs ?	119
2.1.3	Découverte n°3 : socle rigide et superstructure souple	119
2.1.4	Découverte n°4 : l'escalier, du meuble à un rôle dans la gestion des raideurs	120
2.1.5	Découverte n°5 : de la voûte au plancher	122
2.1.5.1	<i>Le plancher en maçonnerie sur voûte</i>	122
2.1.5.2	<i>Le plancher en bois sur voûte</i>	123
2.1.6	Découverte n°6 : le plancher raidisseur de structure	124
2.2	Naissance et invention d'une architecture de poteaux et de planchers	126
2.2.1	De la conception constructive à la conception architecturale	127
2.2.1.1	<i>D'une architecture de maçonnerie...</i>	127
2.2.1.2	<i>... à une architecture de béton</i>	129
2.2.1.3	<i>D'une architecture de colombage...</i>	129
2.2.1.4	<i>... à une architecture de portiques</i>	130
2.2.2	Principes fondamentaux	130
2.2.2.1	<i>Incidence du choix de plancher</i>	130
2.2.2.2	<i>Conception élémentaire des poteaux et des liaisons aux planchers</i>	132

2.3	Conception des planchers, des porteurs et de leurs liaisons	138
2.3.1	Les planchers	138
2.3.1.1	<i>Plancher béton armé à structure unidirectionnelle</i>	138
2.3.1.2	<i>Plancher béton armé coffré à structure bidirectionnelle</i>	139
2.3.1.3	<i>Plancher béton armé sur prédalle béton</i>	140
2.3.1.4	<i>Plancher béton armé sur bacs acier collaborants</i>	141
2.3.2	Les poteaux	144
2.3.2.1	<i>Poteaux courts et liaisons aux planchers</i>	144
2.3.2.2	<i>Les dalles portantes</i>	145
2.3.2.3	<i>Poteaux longs et liaisons aux planchers</i>	145
2.3.2.4	<i>Liaisons amorties</i>	147
2.4	Stabilité des ouvrages	148
2.4.1	Édifices anciens et traitement constructif et architectural	148
2.4.1.1	<i>Planchers indépendants</i>	148
2.4.1.2	<i>Planchers solidaires</i>	149
2.4.2	Édifices récents et contemporains et traitement constructif et architectural	149
2.4.2.1	<i>Planchers indépendants</i>	149
2.4.2.2	<i>Planchers solidaires</i>	150
2.4.3	Réponses architecturales	151

CHAPITRE 3. LES PORTIQUES À NOYAU(X)

	Concentrer les pressions sur un point de dissipation	152
3.1	Présentation	152
3.2	Naissance et évolution des portiques à noyau(x)	153
3.2.1	L'invention	153
3.2.2	Adaptation à une volumétrie architecturale de faible élévation	159
3.2.2.1	<i>La conception des portiques</i>	159
3.2.2.2	<i>Le noyau monolithique</i>	162
3.2.2.3	<i>Le noyau monolithique dédoublé</i>	163
3.2.2.4	<i>Le noyau monolithique dédoublé et raidi</i>	163
3.2.2.5	<i>Le noyau expansé</i>	164
3.2.2.6	<i>Le noyau extrudé</i>	164
3.2.3	Adaptation à une volumétrie architecturale élevée	166
3.2.3.1	<i>Liaison portiques/noyaux</i>	166
3.2.3.2	<i>Conception des noyaux : principe général</i>	167
3.2.4	Adaptation à une volumétrie architecturale importante	170
3.2.4.1	<i>Concentrer les efforts sur un noyau de réception</i>	171
3.2.4.2	<i>Recevoir la charge initiale sur une poutre-bouclier</i>	172
3.3	Stabilité générale du système	175
3.3.1	Fonctionnement et conception des noyaux	175
3.3.1.1	<i>Principe de stabilité sous effort dynamique par la recherche des plans d'équilibre</i>	176
3.3.1.2	<i>Gestion des raidisseurs par les contreventements et l'inertie du noyau</i>	181

3.3.1.3	<i>Gestion des raiders par l'harmonisation des contreventements et de la position des anneaux de serrage</i>	183
3.3.1.4	<i>Organisation des liaisons des planchers avec le noyau</i>	190
3.3.2	Fonctionnement et conception des planchers et des poutres	195
3.3.2.1	<i>Comportement des planchers sous sollicitations statiques</i>	195
3.3.2.2	<i>Comportement des planchers sous sollicitations dynamiques</i>	195
3.4	Le noyau, récepteur « souple » de la pression transmise par les planchers	201
3.5	Épilogue	202
CHAPITRE 4. LES PORTIQUES ET LES PLANCHERS SUSPENDUS		
	Une façon de libérer des espaces voulus vides	204
4.1	Présentation	204
4.2	Naissance et évolution de la conception constructive des systèmes suspendus : les cheminements de l'invention	205
4.2.1	Le porte-à-faux	205
4.2.2	L'allègement pour limiter les flexions	208
4.2.3	Le désencombrement	208
4.2.4	La mobilité des planchers	210
4.3	Les systèmes suspensifs	210
4.3.1	Mécanismes de déformations et lecture architecturale	210
4.3.2	La stabilité des porteurs	214
4.3.3	Conception générale de la stabilité	219
4.3.4	Poutres porteuses	222
4.3.5	Suspentes	228
4.3.6	Maîtrise des oscillations	232
4.4	Quelques références	234

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage résulte d'un cours dispensé et renouvelé continuellement durant de longues années. Pour cette raison, le cheminement en est didactique. Il veut dire au lecteur que l'architecture n'est pas une science mais le résultat jamais achevé d'une polysémie de savoirs autonomes dont sont extraits les éléments qui vont permettre l'invention. L'art de l'architecte est de les discerner puis de se les approprier.

L'aménagement de l'espace ou la réalisation d'un bâtiment s'inscrivent naturellement dans un instant du voyage d'une civilisation et d'une culture dont ils sont témoins et acteurs. Une telle aventure n'est possible que dans la maîtrise de divers savoirs. Savoir construire est l'un d'eux. Il ne saurait se contenter de recettes au risque de sa stérilisation. Aucune recette n'a dicté l'invention du Parthénon, de la coupole du Panthéon, de la cathédrale de Saint-Denis, du dôme de Florence, de la tour Eiffel, du premier immeuble de grande hauteur à Manhattan, de la voûte du CNIT ou du stade olympique de Pékin. Pourtant, aucun de ces ouvrages n'est né *ex nihilo*.

Le savoir se nourrit de ses racines, de son expérimentation et de sa théorisation. Les racines sont une culture. L'expérimentation est la confrontation de l'idée avec la matière. La théorisation est ce moment où l'histoire de l'invention rassemble les outils de son expérience pour faire le point.

La longue histoire de l'acquisition des savoirs élémentaires s'est façonnée sur l'apprentissage, sur les savoir-faire hérités qui au fil du temps se sont enrichis de beaucoup de petites inventions. Elle s'est racontée de bouche à oreille et les Compagnons en ont fait une science avec ses secrets et le mystère de ses tracés et de ses abaques. Il s'agit des structures-poids qui, confiantes en la solidité de leurs murs épais et de leurs couvertures lourdes, ont bâti des architectures installées dans le temps. C'est l'objet d'un premier livre, *Les structures-poids*, chez le même éditeur.

Dans ce deuxième livre, nous racontons comment les portiques ont révélé une architecture devenue légère, souple et capable de mutations rapides de ses fonctions et de ses images. La géométrie et le calcul les ont portés, stimulés par un dessin largement déchargé des codes qui figent les civilisations en fin de cycle. Le confort s'est invité dans le dessin.

Dans un troisième et dernier livre, nous observerons la prouesse et la recherche de la performance comme si un autre monde pouvait soudain surgir d'une courbe trop monotone. Cette ambition ne se situe pas à un moment donné de l'histoire des hommes. Elle est de tous les âges, signifiée par des savoirs subitement réinventés qui se seraient détournés de la répétitivité pour écrire leur propre alphabet.

Chacun de ces trois livres peut être lu et étudié indépendamment, l'ensemble composant l'ouvrage intitulé *De la construction à l'architecture*.

Beaucoup de photos de chantiers sont dues à l'obligeance de Marc Landowski et de Jean-Jacques Soulas, des architectes de talent et de culture qui ont toujours su que l'invention architecturale ne peut se dessiner que si elle peut se construire. Quelques photos proviennent des publications d'édifices conçus par des architectes et des ingénieurs dont l'auteur a compris qu'il s'agissait d'œuvres majeures, quelle qu'en soit l'échelle médiatique, parce que significatives des moments d'étapes dans les savoirs. Beaucoup d'autres images sont venues d'observations faites au cours de voyages, parfois avec des étudiants qui ont bien voulu prêter leurs photos.

Les références imagées au monde de l'archéologie sont prélevées dans les publications accessibles à tous, dont certaines sont dessinées avec talent par Jean-Claude Golvin, architecte et archéologue.

Que chacun en soit chaleureusement remercié.

LES PORTIQUES DE POTEAUX ET DE POUTRES

Construire simplement

Le mot « portique » peut désigner un support de balançoire pour enfants, un détecteur de métaux avant d'accéder aux transports publics, un jeu de poulies et de contrepoids en hôpital pour maintenir relevés un bras ou une jambe, voire les rails d'un pont roulant ou encore toute autre installation bien spécifique d'une fonction (Fig. 1.1a).

Figure 1.1

(a) Un portique en protection d'une fouille

(b) Le portique dans l'Antiquité



1.1 PRÉSENTATION

En archéologie (Fig. 1.1b), le portique est une galerie généralement ouverte sur l'une de ses deux longueurs, couverte par une charpente portée par des colonnes ou des piliers, comme l'était la *stoa* grecque. Qu'il ait été bâti dans l'Antiquité ou une époque plus récente, il porte souvent le nom du style qui dessine les chapiteaux, qu'il soit dorique, ionique, corinthien, toscan, composé ou autre.

Héritière d'un puissant retour aux ordres antiques, la Renaissance a dessiné les portiques en galeries parfois étagées au point d'en faire un élément de reconnaissance d'un style. L'architecture a depuis largement adopté le terme de « portique » pour qualifier des constructions sur piliers ou sur poteaux (Fig. 1.2a/b) avant de l'oublier au milieu du xx^e siècle au privilège de l'expression restrictive de « poteau-poutre » (Fig. 1.2c à e). Il ne restait en effet plus beaucoup de relations entre la définition traditionnelle architecturale de ce terme et les forêts de poteaux et de poutres qui ont caractérisé certaines constructions depuis la vulgarisation de la fonte et du fer, puis de l'acier en emploi unique ou composé avec le béton.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 1.2 Le portique de piliers puis de poteaux, et de poutres : (a) portique de piliers sous les tribunes du stade de Berlin (1933); (b) portique de colonnes en pierre à la porte de Brandebourg (Berlin, xix^e s.); (c) galerie néo-Renaissance de la fin du xix^e s. (Berlin); (d) portique de poteaux et de poutres au centre de Berlin (fin xx^e s.); (e) portique de colonnes en béton sous un pont-rail (Berlin).

Les publications destinées aux architectes comme aux ingénieurs et techniciens du génie civil donnent des portiques un certain nombre de définitions marquées par les sciences du calcul. Elles visent à l'organisation compatible et performante de *barres* (murs, poteaux ou tenseurs) soumises aux concepts traditionnels de compression, de tension, de flexion, de cisaillement et de torsion, et de *nœuds* qui sont les liaisons des barres avec d'autres barres, encastées ou articulées sous diverses formes.

L'expression « poteau-poutre » est aujourd'hui employée sous forme générique par les concepteurs de structures. Elle sous-tend ce qui relève des différents modes constructifs des portiques et le souci de libérer l'espace d'un encombrement structurel trop prégnant. D'une façon peut-être plus appropriée, le terme « ossature » remplace celui de « portique » lorsqu'il s'agit plutôt de petites portées. Les structures spéciales présentées dans *Les structures de hautes performances**, tout en étant issues pour certaines de l'invention des portiques au sens de la physique-mécanique, s'en différencient de façon plus spécifique au regard de leurs destinations. Le mot « portique » aurait-il vécu ?

1.1.1 NAISSANCE ET ÉVOLUTION DU CONCEPT DE PORTIQUE DE POTEAUX ET DE POUTRES

La tradition constructive des structures-poids intègre dans les murs maçonnés des éléments verticaux monolithiques ou constitués de pierres de dimensions plus importantes que celles qui composent les murs. Leur rôle est de raidir un assemblage de moellons hourdés ou pas, de pierres taillées ou de briques (Fig. 1.3). Reliés entre eux par une poutre, ces raidisseurs assurent la continuité de la stabilité du mur tout en permettant un évidement pour les portes et les fenêtres

* Même auteur, chez le même éditeur.



Figure 1.3 Les raidisseurs : le premier pas vers l'adoption de la structure en portique.

La systématisation de ces évidements (Fig. 1.4a) a permis d'inventer une galerie ouverte en substitution d'un mur, du moins sur trois côtés, le quatrième servant de butée (Fig. 1.4b à d). La recherche décorative ou un certain message éthique ou culturel se sont généralement emparés de cette découverte constructive (Fig. 1.4e) et nombre d'historiens en ont fait d'intéressants commentaires dans le registre de l'esthétique. L'accomplissement mais aussi la performance ont été de supprimer les organes de butée et de rendre autonome la stabilité des séries hypostyles, ce que les architectes du temple de Ségeste en Sicile avaient bien compris, la *cella* d'ancrage n'ayant jamais été édifiée. Cette invention scientifique sera reprise par la suite (Fig. 1.4f)*.

* L'étude de la stabilité du temple de Ségeste est publiée parmi les exemples sous le titre Risque sismique et patrimoine bâti (même auteur, même éditeur).

Les monuments sont souvent les points d'orgue à une époque donnée d'un cheminement de la réflexion et de l'invention constructive, qu'ils savent magnifier pour les inscrire dans l'histoire de l'architecture. Ils font alors école et les matériaux les plus pauvres comme les programmes les plus simples s'en inspirent, renouvelant ainsi progressivement le dessin des villes.

Figure 1.4 La galerie ouverte sur au moins un côté : un deuxième pas vers l'adoption de la structure en portique.

(a) Érechthéion, Acropole d'Athènes (Grèce)



(b) Acropole d'Athènes



(c) Médersa à Tachkent (Ouzbékistan)



(d) Liaison péristyle/cella (Athènes)



(e) Érechthéion (Athènes)



(f) Parthénon (Athènes)



1.1.2 TROIS INVENTIONS POUR CONTOURNER LES LOIS DE MASSE

Longitudinalement, le portique voulu pour un important percement de mur voit sa stabilité assurée par le serrage latéral des piliers. Transversalement, le manque relatif de matière (épaisseur) rend sa stabilité plus précaire. Seul

le poids et sa composante verticale compensent la faiblesse du calage. Le poids (c'est-à-dire la quantité de matière) reste cependant l'acteur principal de la résistance des poutres à la flexion et des piliers à la compression, ce qui dicte leurs dimensionnements (Fig. 1.5) : ce fut la première découverte.

La deuxième invention est née d'une recherche de l'économie de mise en œuvre et, préalablement, des transports depuis les carrières et les ateliers de fabrication de briques en Perse, comme depuis les latomies de la Grèce antique telles que celles de Syracuse. Les transports étaient onéreux et mieux valait ne déplacer que les matériaux réellement utiles à l'édification, d'où la taille et le façonnage en carrière, c'est-à-dire la préfabrication.

Tous les éléments d'une structure peuvent se préfabriquer. Plus leurs dimensions sont modestes, plus il devient aisé de les transporter, certes, mais aussi de les entreposer sur le site et de les édifier ensuite. Toutefois, de petits matériaux ne permettent pas encore de franchir de grandes portées, car pour cela il faudra attendre l'invention de l'arc clavé. Il fallait cependant trouver le moyen d'alléger les charges portées par les poutres et l'idée a été de transférer les poids directement sur les piliers en minimisant le rôle du linteau. L'arc en encorbellement a permis de répondre à cette préoccupation (Fig. 1.6a), remplacé par la suite, du moins en Occident, par l'arc clavé nettement plus économique tout en permettant d'élargir les passages libres (Fig. 1.6b).

(a) Arc en encorbellement (Mycènes, 1200 av. J.-C.)



(b) Arc clavé (Monsanto, Portugal, 1100 ap. J.-C.)



Cette invention n'est sans doute pas étrangère à celle de l'alignement vertical des percements dans les murs réduisant ainsi la charge portée par les linteaux. Une telle disposition constructive va caractériser des siècles d'architecture depuis l'expression vernaculaire (Fig. 1.7) jusqu'aux édifices prestigieux ou de masse, à laquelle se réfère toujours le dessin contemporain, même si le problème de la résistance du linteau à la flexion a été résolu par une meilleure élasticité des matériaux.



(a) Porte des Lions à Mycènes (Grèce)



(b) Porte dans le rempart de Mycènes

Figure 1.5 Le rôle du poids dans la stabilisation du portique.

Figure 1.6 L'arc, un moyen de reporter les charges sur les porteurs.



Figure 1.7 L'alignement des percements pour alléger les charges sur les linteaux, à Éphèse (Turquie).

* Môme auteur, chez le môme éditeur.

Figure 1.8 L'arc de décharge : une technique de protection du linteau trop rigide reportant les charges verticales sur les montants (photographies en région centre-est du Portugal).

Enfin, est à remarquer une troisième invention qui, pour modeste soit-elle à l'origine, a permis de protéger les linteaux de pierre d'un risque de rupture, leur flexibilité étant extrêmement faible : il s'agit de l'arc de décharge (voir chapitre 8, *Les structures-poids**). Cette technique est certainement née du monde vernaculaire. La figure 1.8a montre comment un linteau de fenêtre a été simplement protégé des descentes de charges trop importantes. Deux pierres en encorbellement au-dessus du linteau de la fenêtre centrale reportent les poids sur les extrémités de la poutre qui ensuite les concentrent respectivement sur les deux montants de la baie. La poutre de linteau ne porte pratiquement que son propre poids. L'alignement des percements précédemment mentionné est la disposition architecturale qui vient en appui de cette technique. Progressivement, l'arc de décharge s'est technicisé (Fig. 1.8b/c) puis architecturalisé (Fig. 1.8d).

(a) XI^e siècle



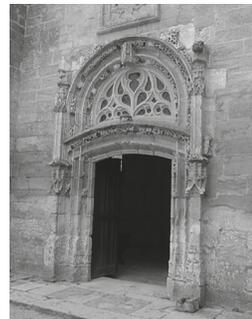
(b) XI^e s.



(c) XI^e s.



(d) XIV^e s.



(a) Versailles, parvis du château (Yvelines)

Un traitement plastique des façades en est né, que la Renaissance mais surtout l'époque classique amèneront à un niveau de qualité d'expression très accomplie qui, comme toujours en architecture, se terminera dans le fac-similé (Fig. 1.9).

Figure 1.9 L'arc de décharge devenu élément de modénature décorative architecturale.



(b) Château de Mafra (Portugal)



(c) Château de Charles Quint à Grenade (Espagne)



(d) Angle de rue à Grenade

1.1.3 DÉCOUVERTE DU RÔLE DES ARTICULATIONS

Une découverte considérable a permis d'assurer la stabilité des portiques aux charges dynamiques, en faisant des chapiteaux et des pieds de colonnes des articulations capables de dissiper l'énergie cinétique provenant des tremblements de terre ou des vents violents. Cette invention a été capitale pour la sécurité des canaux sur les ponts des aqueducs de la République romaine et surtout de l'Empire (Fig. 1.10a)*.

Les grands portiques de l'Antiquité furent d'abord réalisés en bois. Les fûts des colonnes étaient monoblocs et compris comme étant indéformables. Bien que, au temple de Corfou, la pierre ait été substituée au bois pour la première fois, semble-t-il, les fûts furent toujours considérés comme ayant un comportement monolithique. Cette conception perdurera longtemps malgré les effets mécaniques des tremblements de terre dont le temple de Thésée sur l'agora d'Athènes porte toujours les stigmates (Fig. 1.10b/c). Les colonnades du temple sur l'acropole de Dougga en Tunisie en témoignent : elles sont toutes monolithiques sauf une qui est en deux parties, comme si son comportement aux charges dynamiques devait être analogue à celui des autres.

** L'étude de la stabilité des ponts-canaux sur les aqueducs de l'Antiquité est publiée parmi les exemples, sous le titre Risque sismique et patrimoine bâti (même auteur, même éditeur).*

Figure 1.10 En perdant la conception monolithique des colonnes et des piliers, s'est posée la question de la dissipation de l'énergie sans compromettre la stabilité globale.

(a) Aqueduc (Tarragone, Espagne)



(b) Temple de Thésée (Athènes)



(c) Cisaillement des colonnes



Toutefois, il fallait que l'énergie soit dissipée avant d'atteindre le *tympan* du portique qui, sous l'effet d'un balancement, aurait pu se renverser en entraînant l'effondrement de tout ou partie de la charpente, comme en témoignent certains édifices du sanctuaire d'Agrigente (Sicile). Ce rôle fut dévolu aux chapiteaux (Fig. 1.11a) puis aux bases des colonnes qui, posées sur le stylobate, reçurent une assise façonnée pour assurer au mieux la fonction d'articulation, se substituant à la pierre d'assise plus rigide (Fig. 1.11b/c).

Figure 1.11 Les bases et les chapiteaux sont devenus des dissipateurs d'énergie (des articulations), ce qui sera ensuite imagé par la sculpture (photographies provenant de l'Acropole d'Athènes).

(a)



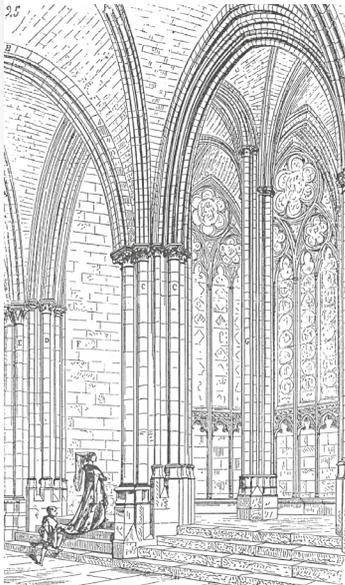
(b)



(c)



Si les liaisons articulées (chapiteaux et bases) des porteurs à leurs assises (périmètre de la *crépis*) et aux poutres (architraves) avaient pour rôle de dissiper une partie de l'énergie avant qu'elle n'atteigne la partie haute de l'édifice, ce n'était cependant pas suffisant. Le porteur (la colonne) monolithique n'apportait pas sa contribution par manque d'élasticité de la pierre. L'adoption des *tambours* devait compenser le manque de souplesse (la raideur k) non pas en apportant de l'élasticité, le matériau restant le même, mais en permettant leur glissement latéral, mouvement dissipateur d'énergie, en jouant le rôle de fusibles successifs. Il restait possible, après un tremblement de terre plus important que les autres, de ré-axer les tambours (rappel, Fig. 1.10c).



(a) Selon Viollet-le-Duc

1.1.4 DE LA DÉCOUVERTE DE L'ÉLASTICITÉ DES MATÉRIAUX À LA GESTION DE LA RIGIDITÉ DES STRUCTURES

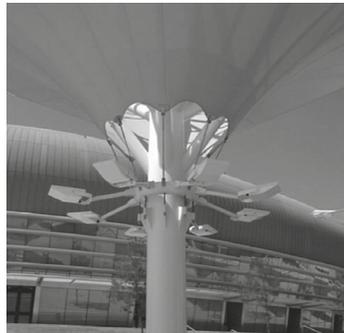
Le XIX^e siècle a fait basculer bien des siècles de conception constructive des portiques en pierre, et d'une architecture qui en dépendait, vers l'appropriation de l'élasticité d'un nouveau matériau, le fer qui deviendra l'acier. À peine plus tard, la chimie inventait les colles, augmentant considérablement les comportements du bois (lamellé-collé), tout comme elle inventait les composites qui permettront prochainement de faire du verre et des synthétiques des composants structurels courants.

En intégrant l'élasticité des matériaux, la conception constructive allait entraîner une redynamisation de l'invention architecturale qui ressassait par trop un passé révolu. La période des cathédrales gothiques en Occident comme celle des structures souples en bois, en Asie, avaient déjà ouvert des portes, mais elles ne seront vraiment revisitées que dans la seconde moitié du XIX^e siècle.



(b) Medina del Campo (Espagne)

Figure 1.12 Oser un seul poteau encastré au sommet ou encastré en pied : (a et b) deux époques et la même recherche du pilier unique ; (c et d) équipements en piliers uniques sur le site de la foire de Lisbonne.



(c)



(d)

Le portique peut se contenter d'un seul poteau comme l'avaient osé les architectes de l'époque gothique dans certaines salles capitulaires ou dans certains transepts techniques, ce que reprendra Calatrava récemment à la gare de l'Orient à Lisbonne (Fig. 1.12a/b). Le principe constructif étant acquis et compris, l'architecture peut alors en exiger les performances tout comme de tout temps elle a valorisé l'objet en soignant le détail et notamment celui des liaisons. Dès lors s'est ouverte une voie chaque fois plus large dans la recherche de la performance (Fig. 1.12c/d), celle qui marque une époque et parallèlement un pouvoir exprimé d'ailleurs de tout temps dans les « grands chantiers ».

Le portique a pu aussi accéder à la performance des grandes portées dont G. Eiffel sera l'un des pionniers avec les ponts dont il a équipé nombre de réseaux viaires et ferroviaires, alliant les articulations et l'élasticité des matériaux. L'acier, en composition avec les bétons, allait à son tour inventer un matériau dont les performances mécaniques ont autorisé aussi bien l'audace (Fig. 1.13) que le minimalisme économique des usines et des entrepôts, des locaux sociaux ou des bureaux.

L'image 1.12c montre qu'un seul poteau porteur est possible à condition qu'il soit encastré en pied. L'image 1.13 montre qu'une grande portée est possible à condition que la poutre puisse se déformer sous l'action de charges statiques ou dynamiques sans rompre ses liaisons aux porteurs : il s'agit de liaisons articulées. Il existe en effet une relation d'interdépendance entre les concepts d'encastrement et d'articulation, ce qui est le premier fondement de la stabilité des portiques. L'art de l'architecte est de comprendre cette relation et d'en faire autre chose qu'une traduction purement technique, soit en la montrant par le « détail d'architecture », soit en la faisant oublier (Fig. 1.14).

Le deuxième fondement de l'invention d'une architecture de portiques est la gestion de la vulnérabilité aux charges statiques comme aux charges dynamiques ; il repose sur l'élasticité des matériaux et ouvre les réflexions portées par le calcul et souvent vérifiées par l'observation des effets des vents violents et des tremblements de terre. Il concerne les poteaux qui vont répondre à deux comportements très éloignés l'un de l'autre. Il s'agit, d'une part, des *porteurs courts* (Fig. 1.15a/b), conception à l'origine de nombre de désastres sous charges dynamiques : ces poteaux (ou ces murs) sont interrompus à chaque niveau soit par un plancher soit par une poutre, et sous une force appliquée horizontalement ils se mettent en accordéon, changeant de direction d'inclinaison à chaque interruption de leur linéarité mécanique, à la manière des dents de scie. D'autre part, les *porteurs longs* (Fig. 1.15c/d) sont en revanche ininterrompus sur toute la hauteur des édifices et oscillent sur leur axe de façon homogène, apportant aux immeubles la souplesse qui permet d'amortir les effets des charges dynamiques.



Figure 1.13 Pont sur le canal de Corinthe (Grèce).



Figure 1.14 Auvent en terrasse de bar, à Lisbonne.



(a) Immeuble à Chania (Crète)



(b) Cour du palais de Charles Quint à Grenade



(c) Immeuble à Stuttgart



(d)

Figure 1.15 (a, b) Porteurs courts (interrompus à chaque niveau). (c, d) Porteurs longs (non interrompus sur toute leur longueur).



Figure 1.16 Lisbonne.

Le troisième fondement est celui de la stabilité globale. La contrefiche sert essentiellement à qualifier une intersection (un nœud) et en particulier à encasturer, c'est-à-dire à raidir la liaison de deux pièces entre elles (par exemple, une poutre avec un poteau ou un mur). Elle est un appont de stabilité aux structures en pierre, en maçonnerie ou en bois. L'histoire de la construction montre comment, en s'allongeant et en reliant un pied de poteau et l'extrémité d'une poutre dans un plan donné, cette contrefiche est devenue une *barre de contreventement* (Fig. 1.16). L'étape suivante a été la *triangulation globale* de la structure en reliant dans un volume donné poutres et poteaux dans les trois dimensions. Une nouvelle étape est en passe d'être atteinte, quand la même géométrie permet deux fonctions différentes réunies en une seule, celle des porteurs et celle des portés : la spire.

Trois fondements de la conception des portiques vont en assurer les performances :

- la coordination des liaisons (les nœuds) des poutres (ou des planchers) avec les poteaux (ou les murs) : articulation ou encastrement ;
- l'élasticité des porteurs : courts ou longs ;
- la stabilité globale de la structure en ses trois dimensions : contreventement du plan, triangulation du volume ou spire.