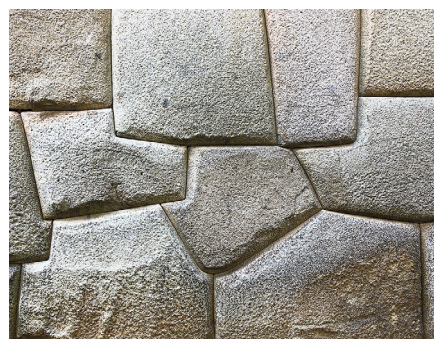




Alain Billard

Risque sismique et patrimoine bâti

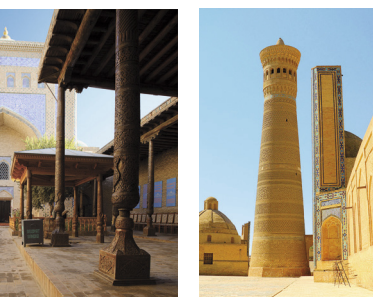
Comment réduire la vulnérabilité :
savoirs et savoir-faire



COLLECTION
EUROCODE

afnor
ÉDITIONS

EYROLLES



Publics

- Techniciens et ingénieurs des bureaux d'études
- Architectes
- Responsables techniques des collectivités locales
- Enseignants et étudiants (architecture, patrimoine, archéologie)

Couverture : Christophe Picaud

COLLECTION
EUROCODE

afnor
EDITIONS

EYROLLES

Alain Billard

Risque sismique et patrimoine bâti

Comment des bâtiments anciens ont-ils pu résister aux tremblements de terre dans des régions notoirement exposées aux risques sismiques ?

Au fil de nombreuses missions dont il fut chargé, tant en France qu'à l'étranger, Alain Billard a longuement étudié les conséquences des séismes sur le patrimoine bâti. Architecte, enseignant et membre de l'Association française du génie parasismique, il a rassemblé dans ce manuel — illustré de près de 300 photographies et de 200 schémas — les observations qu'il destine à tous ceux qui ont à charge de restaurer et de protéger des bâtiments endommagés ou menacés par un séisme.

On verra que l'étape préalable est le renforcement, sachant que — rédigé pour des bâtiments neufs — l'Eurocode 8 ne s'applique pas aux édifices anciens (sauf à en repenser radicalement la structure).

Les techniques initiales de protection qui ont permis à nombre d'édifices de traverser les siècles pour nous révéler les principes de leur conception architecturale sont ici revisitées. Elles ne sauraient être exhaustives mais elles offrent l'occasion de réfléchir et, enfin, de comprendre certaines des règles qui sous-tendent l'Eurocode 8, lesquelles pourront, dès lors, être relues sous un autre éclairage.

Sommaire

I. Éléments de physique du bâtiment • Notions de base – Éléments spécifiques à la prévention du risque sismique

II. Observations dans des régions à risques sismiques : éléments d'une culture de protection des bâtiments

• Balancement et déplacement – Terrassements et fondations – Murs, poteaux et piliers dissipateurs d'énergie
– Murs, piliers, raidisseurs : porteurs courts et porteurs longs – Ceinture sommitale, ceintures intermédiaires
– Percements de portes et de fenêtres – Planchers, escaliers et charpentes – Régularité des volumes, solidarisation urbaine, joints de rupture

III. Solutions de confortement : cas d'étude • Méthode – Grange du XIX^e siècle en montagne pyrénéenne

– Regroupement de deux bâtiments XV^e siècle et XVI^e siècle – Immeuble d'habitation en béton armé des années 1930.

Architecte, enseignant à l'ENSAP-Bordeaux (où il a fondé le DPEA « Risques naturels majeurs et architecture ») et l'ENSA-PB (co-responsable du DSA « Architecture et risques majeurs »), Alain Billard s'est très tôt orienté vers la problématique de la sismicité et des bâtiments antiques. Ayant reçu une formation en écoles d'ingénieurs, diplômé d'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. Auteur d'un ouvrage historique et technique (*De la construction à l'architecture*, à paraître), il a traité de l'enseignement de la construction et, par ailleurs, de la stabilité des bâtiments anciens, dans de nombreux colloques internationaux.

Dans la même collection

Victor Davidovici (dir.), *Pratique du calcul sismique*.

Wolfgang & Alan Jalil, *Conception et analyse sismiques du bâtiment. Guide d'application de l'Eurocode 8 à partir des règles PS 92/2004*.

Claude Saintjean, *Introduction aux règles de construction parasismique. Applications courantes de l'Eurocode 8 à la conception parasismique*.

En couverture, de gauche à droite et de haut en bas :

Image du séisme de 2009 à l'Aquila (Italie) © Matteo Gabrielli/Shutterstock

À droite, poteaux en bois à Khiva (Ouzbékistan) © Dudarev Mikhail/Fotolia

Le minaret Kalon à Boukhara (Ouzbékistan) © Natalia Davidovich/Shutterstock

L'aqueduc romain de Ségovie (Espagne) © mrks_v/Fotolia

Ancien mur inca à Cuzco (Pérou) © Vadim Petrakov/Shutterstock

En quatrième de couverture, deuxième photo à gauche à partir du haut :

Ruines d'un mur romain à Londres © Claudio Divizia/Shutterstock

www.editions-eyrolles.com

www.boutique-livres.afnor.org

Risque sismique et patrimoine bâti

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

AFNOR ÉDITIONS
11, rue Francis-de-Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
www.boutique-livres.afnor.org

Le programme des Eurocodes structuraux comprend les normes suivantes, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de parties :

- EN 1990 Eurocode 0 : Bases de calcul des structures
- EN 1991 Eurocode 1 : Actions sur les structures
- EN 1992 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton
- EN 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier
- EN 1994 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton
- EN 1995 Eurocode 5 : Calcul des structures en bois
- EN 1996 Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie
- EN 1997 Eurocode 7 : Calcul géotechnique
- EN 1998 Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
- EN 1999 Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium

Les normes Eurocodes reconnaissent la responsabilité des autorités réglementaires dans chaque État membre et ont sauvegardé le droit de celles-ci de déterminer, au niveau national, des valeurs relatives aux questions réglementaires de sécurité, là où ces valeurs continuent à différer d'un État à un autre.

Alain Billard

Risque sismique et patrimoine bâti

Réduction de la vulnérabilité :
savoirs et savoir-faire

EYROLLES

afnor
ÉDITIONS

Dans la même collection, en coédition Eyrolles/Afnor :

Jean-Marie Paillé, *Calcul des structures en béton*, 2^e éd., 2013, 744 p.

Jean-Louis Granju, *Introduction au béton armé – Théorie et applications courantes selon l'Eurocode 2*, 2^e éd., 2014, 288 p.

Jean Roux, *Pratique de l'Eurocode 2*, 2009, 626 p.

— *Maîtrise de l'Eurocode 2*, 2009, 338 p.

Collectif APK/Jean-Pierre Muzeau, *La construction métallique avec les Eurocodes. Interprétation ; exemples de calcul*, 476 p.

— *Manuel de construction métallique – Extraits des Eurocodes 0, 1 et 3*, 2^e éd., 2013, 256 p.

Yves Benoit, *L'Eurocode 5 par l'exemple. Études de cas résolues*, 2014, 352 p.

Yves Benoit, Bernard Legrand et Vincent Tastet, *Dimensionner les barres et les assemblages en bois. Guide d'application de l'EC5 à l'usage des artisans*, 2012, 256 p.

— *Calcul des structures en bois. Guide d'application des Eurocodes 5 et 8*, 3^e éd., 2014, 484 p.

Marcel Hurez, Nicolas Juraszek, Marc Pelcé, *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie. Guide d'application de l'Eurocode 6*, 2^e éd. 2014, 336 p.

Victor Davidovici, Dominique Corvez, Alain Capra, Shahrokh Ghavamian, Véronique Le Corvec et Claude Saintjean, *Pratique du calcul sismique*, 2013, 244 p.

Claude Saintjean, *Introduction aux règles de construction parasismique. Applications courante de l'Eurocode 8 à la conception parasismique*, 2014, 352 p.

Wolfgang & Alan Jalil, *Conception et analyse sismiques du bâtiment. Guide d'application de l'Eurocode 8 à partir des règles PS 92/2004*, 2014, 368 p.

Xavier Lauzin, *Le calcul des réservoirs en zone sismique*, 2013, 100 p.

Alain Capra, Aurélien Godreau, *Ouvrages d'art en zone sismique*, 2012, 128 p.

Victor Davidovici, Serge Lambert, *Fondations et procédés d'amélioration du sol. Guide d'application de l'Eurocode 8*, 2013, 160 p.

Sauf mention contraire, les photographies et les schémas sont de l'auteur.

Droits réservés pour les autres illustrations.

Mise en pages : GraphieProd/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.

© Afnor et Groupe Eyrolles, 2014

ISBN Afnor : 978-2-12-465460-4

ISBN Eyrolles : 978-2-212-13613-5

Sommaire

Avant-propos	XI
Introduction	1
CHAPITRE 1. Éléments de physique du bâtiment	5
CHAPITRE 2. Observation dans des régions à risques sismiques : éléments d'une culture de protection des bâtiments	173
CHAPITRE 3. Comprendre pour proposer des solutions de confortement : quelques cas d'étude	293
Annexes	359

Table des matières

Avant-propos	XI
Introduction	1
CHAPITRE 1. Éléments de physique du bâtiment	5
1.1 Notions de base	5
1.1.1 Les efforts et les équilibres	5
1.1.1.1 <i>Mouvements fondamentaux d'un bâtiment</i>	5
1.1.1.2 <i>Cheminement réactif aux sollicitations: recevoir l'énergie, la stocker et la dissiper</i>	6
1.1.1.3 <i>Cheminement de l'énergie et prise en charge par la géométrie des structures en portique</i>	11
1.1.1.4 <i>Rappel des quelques éléments fondamentaux de géométrie sur le cheminement des forces</i>	12
1.1.1.5 <i>Tableau de correspondances des pressions</i>	28
1.1.2 L'équilibre statique	28
1.1.2.1 <i>Définitions générales et valeurs conventionnelles des paramètres</i>	28
1.1.2.2 <i>Les descentes de charges</i>	34
1.1.2.3 <i>Valeurs réglementaires paramétrables des matériaux</i>	38
1.1.2.4 <i>Éléments de calculs approchés des constituants d'une structure</i> ...	41
1.1.2.5 <i>Annexe sur la flexion simple des planchers</i>	47
1.1.2.6 <i>Faire varier les raideurs des constituants de la structure en situation statique</i>	56
1.1.2.7 <i>Conception globale de l'équilibre statique d'un bâtiment en portiques</i>	60
1.1.3 L'équilibre dynamique	62
1.1.3.1 <i>Définition générale</i>	62
1.1.3.2 <i>Descentes de charges</i>	62
1.1.3.3 <i>Définitions des concepts de poteaux courts et de poteaux longs</i> ...	69
1.1.3.4 <i>Modes d'approche de la stabilité dynamique des structures par les raideurs</i>	72
1.1.4 Un bâtiment est une console	77
1.1.4.1 <i>Concept de console et modes de déformations</i>	77
1.1.4.2 <i>Comportement isotrope, comportement anisotrope</i>	89
1.1.4.3 <i>Porteurs courts et porteurs longs: les différents comportements en situation statique et en situation dynamique</i>	89

1.1.5	Équilibre des structures	93
1.1.5.1	<i>Définitions des différentes structures : les structures-poids, les structures en portiques et les structures spéciales ou de hautes performances</i>	93
1.1.5.2	<i>Comportements spécifiques</i>	94
1.2	Éléments de physique spécifiques à la prévention du risque sismique	108
1.2.1	Données générales	108
1.2.1.1	<i>Origine et lecture des vibrations</i>	108
1.2.1.2	<i>Fréquences et périodes</i>	115
1.2.1.3	<i>Effet de site : définitions, recommandations</i>	124
1.2.2	Données spécifiques	131
1.2.2.1	<i>Classification des sols, vitesses de cisaillement et densités</i>	131
1.2.2.2	<i>Hauteur de calcul</i>	133
1.2.2.3	<i>Critères de régularité des bâtiments</i>	134
1.2.2.4	<i>Barycentre des masses (G), barycentre des torsions (T), réduction de l'excentricité ($e_0 = GT$)</i>	147
1.2.2.5	<i>Cas particulier des bâtiments sans planchers intermédiaires</i>	154
1.2.2.6	<i>Accélération de calcul selon EC.8</i>	155
1.2.2.7	<i>Joints de rupture, joints de dilatation</i>	157
1.2.3	Force statique équivalente/forces latérales	162
1.2.3.1	<i>Détermination des paramètres soumis à des évaluations appréciables</i>	164
1.2.3.2	<i>Spectre de réponse élastique permettant de déterminer le paramètre a_s</i>	166
1.2.3.3	<i>Déplacement de calcul du sol (d_g)</i>	168
1.2.3.4	<i>Spectre de calcul pour l'analyse élastique</i>	168
1.2.3.5	<i>Coefficient de comportement : q_a</i>	170
1.2.4	Méthode algébrique pour le calcul des déplacements des niveaux	170
1.2.4.1	<i>Équation simplifiée d'équilibre</i>	170
1.2.4.2	<i>Démarche algébrique pour le calcul des déplacements</i>	171
CHAPITRE 2.	Observation dans des régions à risques sismiques : éléments d'une culture de protection des bâtiments	173
2.1	Balancement et déplacement	174
2.1.1	Rigidité globale de l'édifice et mode de fondation	174
2.1.2	Types de structure portante (poteaux longs, poteaux courts) et modes de fondation	176
2.1.3	Autres paramètres	179
2.2	Terrassements et fondations	179
2.2.1	À propos des assises des colonnades du temple de Ségeste	181
2.2.1.1	<i>Les colonnades ne se sont jamais effondrées</i>	182
2.2.1.2	<i>L'ouvrage peut être fragilisé par l'effet de site</i>	184

2.2.1.3	<i>Le premier tambour de chaque colonne est posé sur une pierre spéciale</i>	185
2.2.2	À propos des fondations et des piliers des ponts-canaux sur les aqueducs romains	185
2.2.3	À propos des assises des poteaux et des murs anciens en Ouzbékistan	194
2.2.3.1	<i>Les pieds de poteaux</i>	194
2.2.3.2	<i>Les fondations des murs</i>	198
2.2.3.3	<i>Conclusion des observations faites sur les fondations</i>	204
2.3	Murs, poteaux et piliers dissipateurs d'énergie	205
2.3.1	Le mur en terre façonné sur place	206
2.3.2	Mise en œuvre en pleine masse	207
2.3.2.1	<i>Le mur en brique</i>	207
2.3.2.2	<i>Le mur en pierre</i>	209
2.3.2.3	<i>Mise en œuvre en parement-coffrage</i>	210
2.3.2.4	<i>Mise en œuvre en remplissage de portiques, le problème des contreventements</i>	213
2.3.3	Les glissières dissipatrices d'énergie	215
2.3.4	Les habillages dissipateurs d'énergie	225
2.4	Murs, piliers (poteaux), raidisseurs : porteurs courts et porteurs longs	227
2.4.1	À propos des piliers	228
2.4.2	À propos des murs	237
2.4.2.1	<i>Aparté : mur ou pilier ?</i>	237
2.4.2.2	<i>Murs porteurs courts et murs porteurs longs</i>	238
2.4.3	À propos des mesures de confortement : portage des murs	240
2.4.4	Contreventements et triangulation	244
2.4.5	Bras de levier	248
2.5	Ceinture sommitale, ceintures intermédiaires	252
2.5.1	Ceinture sommitale, ceinture de couronnement	253
2.5.2	Ceintures intermédiaires	255
2.5.3	Conclusion à propos des ceintures	255
2.6	Percements de portes et de fenêtres	257
2.7	Planchers, escaliers et charpentes	260
2.7.1	Pourquoi une charpente effondrée ?	263
2.7.2	Pourquoi un plancher effondré ?	266
2.7.3	Rôles dans la stabilité de l'édifice	269
2.8	Régularité des volumes, solidarisation urbaine, joints de rupture	269
2.8.1	À propos des édifices isolés	269
2.8.2	À propos des édifices accolés le long des rues	273
2.8.3	Solidarisation mécanique des bâtiments dans les îlots urbains de culture parasismique	275

2.8.4	Joint de rupture	278
2.8.4.1	<i>Entrechocs et martèlement : les entrechocs, le martèlement, le concept de fusible, comprendre autrement le joint de rupture ...</i>	278
2.8.4.2	<i>Joint de rupture urbains</i>	282
2.9	Orientation et inertie	282
2.9.1	Observations des désordres sur les édifices	283
2.9.2	Comprendre les traces des désordres	285
2.9.2.1	<i>Une démarche d'observation : un exemple, l'église paroissiale de Nay (Pyrénées-Atlantiques)</i>	285
2.9.2.2	<i>Modéliser les déformations pour comprendre les mouvements réactifs : un exemple, la cathédrale d'Ica (Pérou)</i>	290
2.9.3	Le message de l'implantation et de la disposition des bâtiments dans un village ancien	291
 CHAPITRE 3. Comprendre pour proposer des solutions de confortement : quelques cas d'étude		
3.1	Une méthode	294
3.2	Exemple n° 1 : Une grange jadis habitée en montagne pyrénéenne construite au xix^e s.	297
3.2.1	Étape n° 1 : Diagnostic	297
3.2.2	Étape n° 2 : Comprendre l'édifice	300
3.2.2.1	<i>Vérification de la régularité</i>	300
3.2.2.2	<i>Modélisation de la structure</i>	302
3.2.2.3	<i>Simulation de la déformation des porteurs</i>	303
3.2.2.4	<i>Assimiler les murs porteurs à des portiques</i>	304
3.2.3	Étape n° 3 : Proposition de confortement de la structure	305
3.2.3.1	<i>À propos des murs</i>	305
3.2.3.2	<i>À propos des planchers</i>	310
3.2.3.3	<i>À propos des charpentes</i>	311
3.2.4	Une proposition pour améliorer la fonction d'usage : modifier la volumétrie d'une maison existante	313
3.3	Exemple n° 2 : Regroupement de deux bâtiments adossés pour n'en faire qu'un seul (xvi^e et xix^e s.)	316
3.3.1	Étape n° 1 : Diagnostic	318
3.3.2	Étape n° 2 : Comprendre l'édifice	323
3.3.3	Étape n° 3 : Recherche de l'équilibre et propositions de confortement	326
3.3.3.1	<i>Recherche de l'équilibre et traduction architecturale</i>	326
3.3.3.2	<i>Recherches de solutions techniques pour permettre à la fois l'équilibre et sa mise en œuvre architecturale : le confortement ...</i>	329
3.4	Exemple n° 3 : Un immeuble d'habitation en béton armé des années 1930	338
3.4.1	Étape n° 1 : Diagnostic	339

3.4.2	Étape n° 2: Comprendre l'édifice et apporter éventuellement un premier confortement	340
3.4.3	Étape n° 3: Proposition de confortement	343
3.4.3.1	<i>Régularité</i>	343
3.4.3.2	<i>Barycentres des masses et des torsions</i>	343
3.4.3.3	<i>Force équivalente</i>	343
3.4.3.4	<i>Gestion des poteaux longs</i>	352
3.4.4	Du confortement à l'architecture	353
Conclusion		358
Annexes		359

Avant-propos

Pierre Casabonne, aujourd'hui maire d'Arette dans les Pyrénées-Atlantiques, était encore enfant ce 13 août 1967 quand le bourg a été détruit comme l'a été la maison familiale. Du Noël qui a suivi est resté le souvenir ému de tous ces cadeaux qui sont arrivés de partout pour les enfants du village. Depuis, son action politique locale et régionale est portée par un message qui le guide :

Quand on a beaucoup reçu, il faut savoir beaucoup donner

Le drame d'Arette a donné en France l'élan d'une science nouvelle dont l'intuition était née aux lendemains du séisme de Lambesc en 1907. Elle est portée par des chercheurs qui, depuis, lui ont consacré beaucoup de leur énergie ; dès lors, chaque fois qu'un tremblement de terre allait se produire dans le monde, les observations en ont été publiées. Recoupées, elles ont donné les Recommandations, puis les Règles Parasismiques (PS) et maintenant l'Eurocode 8 (EC.8) qui s'impose pour les bâtiments neufs ou pour les interventions lourdes sur ceux qui existent, depuis le 1^{er} mai 2011 dans le cadre de la redéfinition des zones soumises au risque sismique.

La conception des constructions neuves dont les structures sont en béton armé, en bois, en métal et bientôt en composites bénéficie aujourd'hui d'un panel de règles à respecter souvent extensibles au confortement d'édifices récents. Il n'en est pas de même du patrimoine bâti ancien édifié avec des savoir-faire locaux qui au mieux ont fait régionalement école. Ils ont évolué très lentement dans les différentes contrées du monde, souvent isolées les unes des autres et disposant de matériaux et d'outils bien spécifiques. Qu'elles soient soumises à la récurrence de tremblements de terre et les constructeurs attentifs ont su inventer des techniques astucieuses, même si elles sont souvent partielles, pour protéger leurs édifices. Cependant, ces savoirs ne sauraient être généralisés même à l'intérieur d'une même région.

Tous les matériaux de construction ont vocation à être mis en œuvre pour résister aux pressions sismiques, même avec des succès inégaux. L'histoire nous en est témoin, encore faut-il vouloir l'observer et la comprendre pour aller au-delà du simple regard en se posant la question : et si j'avais à construire cet édifice avec les matériaux qui le constituent et les savoirs contemporains ? Les matériaux disponibles, les règles de calcul réadaptées et la géométrie sont

autant d'outils à mettre au service du confortement du patrimoine bâti ancien loin de toute tentation esthétique de la reproduction à l'identique ou du camouflage. Telle est la démarche de recherche d'un confortement possible que nous avons adoptée.

Construire est une science, la résultante de nombreux savoirs qui puisent dans d'autres savoirs à un instant donné pour les réentendre à l'aune de ses besoins. L'architecture s'appuie sur cette polysémie pour raconter et continuer l'histoire des civilisations, des messages qui traversent les lustres même si, mortels, ils en confieront un jour les traces aux historiens.

Ce livre veut contribuer à apporter des outils simples et contemporains aux gens du bâtiment qui travaillent et vivent dans les régions où le risque sismique est latent au point d'en initier une culture. Des outils portés par des savoirs hérités, relus par des rappels simples aux règles de construction courante qu'il suffirait souvent de respecter et par des calculs portés par la physique élémentaire; mais aussi des outils plus sophistiqués repensés et publiés par des chercheurs soucieux d'apporter encore plus.

Des règles sont édictées, succédant à des savoirs transmis sur les proportions devenues « règles de régularité », sur les équilibres mécaniques que portait autrefois la seule géométrie, sur les assemblages publiés dans les « Guides » et qui relevaient des secrets du compagnonnage; ces règles ont souvent été réinterprétées localement, nourries par l'intelligence inventive des uns ou des autres, quelquefois subitement abandonnées, puis un beau jour réinitées par une intuition entendue.

Le calcul ou la construction d'une certaine logique convieraient-ils la vérité comme l'ont cru longtemps dans leurs domaines la théologie puis la philosophie?

Le patrimoine architectural de l'humanité est un livre ouvert, il ponctue et affirme les savoirs et les ambitions de chaque époque. Il révèle ces inventions de génie qui l'ont installé dans l'éternité et sur lesquelles notre temps s'appuie. C'est ce regard qui va être porté pour comprendre l'invention alors qu'à son entour, trop fragile, le monde vernaculaire a rejoint les archives de ceux qui font métier de raconter l'histoire.

Introduction

Réduire la vulnérabilité ...

Faite de matière, l'architecture bâtie a vocation temporelle. Trois facteurs en portent la vulnérabilité : incontournable est le vieillissement naturel des matériaux en œuvre, qu'ils soient d'extraction simple ou de taille, ou qu'ils soient le résultat de transformations parfois sophistiquées ; de façon plus subtile, en modifiant continuellement les fonctions d'usage, l'action anthropique se renouvelle sur elle-même jusqu'aux limites d'un possible parfois franchies ; la nature, enfin, qui reçoit l'ouvrage et veut le soumettre. Trois acteurs indissociables dont l'homme-constructeur cherche depuis toujours à tromper la vigilance par des codes, par des conventions qui vont jusqu'à faire loi.

L'Histoire montre que les exigences de l'environnement, celles des mouvements des sols, des vents violents, des inondations et autres agents actifs ont été considérées au point qu'au ^{xiii}^e siècle le Khan des Khans voulait mesurer l'importance relative des séismes, et donc les conséquences sur l'économie de son empire, comme le rapporte Marco Polo sous la plume de Gary Jennings¹. Mais réduire la vulnérabilité n'est pas la supprimer, et le mot sous-tend qu'il y ait harmonisation entre la mise en œuvre de la matière, l'équilibre des structures et l'adaptation aux contraintes physiques de l'environnement. Les deux premières exigences sont de longue date l'objet de règles qui s'imposent à tous, évoluant avec la recherche et l'expérience. La troisième voit croître son importance au fil des récentes décennies avec les catastrophes successives qu'amplifie la densification des populations ; elle est en train de prendre la place qui lui échoit, celle d'un paramètre dans l'équation scientifique de la stabilité des édifices. Son impact sur la conception architecturale sera largement aussi marquant que celui du confort aujourd'hui décliné sur tous les tons, ou comme l'était celui de la sécurité dans l'histoire des guerres.

1. Marco Polo, *Les Voyages interdits*, T2 : *À la cour du grand Khan*, Télémaque, 2008.

... du patrimoine bâti ...

L'image de « patrimoine bâti » est couramment attachée à celle des édifices et ouvrages monumentaux. Certes, ces architectures sont l'expression la plus élaborée des savoirs et des savoir-faire d'une époque donnée dans une région donnée. Édifié avec des moyens beaucoup plus modestes, le patrimoine vernaculaire qualifie, à l'opposé du monumental, les maisons du monde au quotidien, les outils de la production économique, l'exercice collectif, mais aussi les villages et les bourgs, les centres des villes dessinés par l'artisanat et le commerce, aujourd'hui tous annoncés par des images symboliques sur les bords des routes. Qu'il nomme l'un ou qu'il nomme l'autre, le patrimoine reste l'affaire des hommes, leur lieu de vie et celui de leurs racines, celui d'une culture qui façonne une civilisation. Et puis il y a l'environnement immédiat sans cesse remodelé par la main de l'homme et par les mutations naturelles comme le racontent Jean-Robert Pitte¹, Fernand Braudel² ou, dans une toute autre perspective, Jean Pirart³.

... et du patrimoine culturel

Les manuscrits de Qumrân, une mémoire souillée par l'histoire de la haine, la bibliothèque d'Alexandrie détruite par l'échec d'un défi aux lois de la nature comme l'ont été Pompéi et Herculaneum, et plus récemment Syracuse, sont de ce patrimoine intellectuel tout comme Bam, Ica ou les régions des Abruzzes en Italie et de Lorca en Espagne. Étaient aussi de nos richesses ces milliers de petites collections privées ou villageoises victimes d'autodafés à l'image du pillage de la bibliothèque d'Athènes au début du XIII^e siècle. De la naissance à l'oubli : ainsi s'évanouissent les savoirs que prolongent, pour un temps, les images de l'imaginaire ou de la décoration.

Restauration, conservation, et parallèlement muséification, « façadisme », une mémoire jusqu'à l'insolite, voilà des mots qui se lisent très différemment selon que l'on soit dans un centre-ville européen avec des façades moyenâgeuses dont on doit garder l'image tandis que les rues et les places qu'elles bordent sont des refontes fort actualisées, que l'on soit sous les voûtes de la basilique Saint-François d'Assise reconstruites avec du teflon et des ressorts pour les émouvantes fresques de Giotto rendues aux regards du millénium, ou que l'on soit dans le quartier historique populaire de l'artisanat de Pékin dont les Jeux olympiques se sont affranchis. Autant de choix dictés par des cultures, par des idéologies de la propriété qui à un moment décident de l'héritage.

C'est sous une tout autre conception de la fonction d'usage que se situe la recherche de *la réduction de la vulnérabilité du patrimoine bâti*. Elle est essentiellement liée à l'économie prise au sens de la vie ou de la survie d'une région. Haïti, début 2010 : près de deux cent cinquante mille morts et blessés, les infrastructures détruites et la misère accrue. Le Chili, quelques semaines plus tard : huit cents morts et blessés, les infrastructures rapidement remises en état. Deux séismes dans une même région, de magnitudes importantes et analogues, dont les conséquences sont tellement opposées. Deux exemples encore : L'Aquila, cette ville italienne de la Renaissance, cité maîtresse des Abruzzes touchée par le tremblement de terre de 2009,

1. *Histoire du paysage français*, Tallandier, 2 vol., 1983.

2. *Les Mémoires de la Méditerranée*, Éd. de Fallois, 1998.

3. *Une histoire de la Terre*, Syros, 1994.

et dont les élus refusent l'abandon avec pugnacité ; l'année suivante, Lorca en Espagne subit de graves dégâts sismiques dont les habitants ont immédiatement entrepris d'effacer courageusement les traces.

Restauration, conservation, ces mots ne sont plus de circonstance et ne sont plus tributaires d'une quelconque idéologie. Pour restaurer, pour conserver, il faut d'abord *conforter* au risque de perdre l'objet. Si la cathédrale gothique de Leninakan (Gumri ou Gyumri) en Arménie avait été confortée avant le tremblement de terre qui a détruit la région et plus particulièrement la ville voisine de Spitak en 1988, peut-être aurait-elle pu être *restaurée*, conservant de la sorte son importance culturelle et culturelle ainsi que sa symbolique.

Dès lors qu'un ouvrage a franchi les siècles et survécu aux sollicitations environnementales parfois brutales, c'est qu'il a mis en place dès sa fondation un système de protection qu'il nous appartient de redécouvrir. Il ne s'agira pas de le répéter par un mimétisme récusable, mais de l'entendre comme une porte ouverte vers des solutions de renforcement qui seront désormais repensées et portées par les matériaux, les techniques et les savoirs contemporains. Quant à l'architecture, elle trouvera, dans les solutions constructives proposées, un atout de fond, une exigence supplémentaire à sa qualification et les chances de sa pérennité.



Figure 1.0 Sismographe chinois (dynastie Han, 206 av.J.-C.-220 ap.J.-C.).

Les trois chapitres qui composent cet ouvrage font cheminer sur une même ligne la conception architecturale et la conception constructive. Pour cette raison, les calculs, quand ils sont nécessaires, restent dans leur rôle d'appui à l'architecture pour lui indiquer les limites des choix possibles de structure et en permettre le dessin par le prédimensionnement. Une fois la conception globale arrêtée, il revient aux bureaux d'études spécialisés d'aller plus avant sans que ne soient remis en cause les choix essentiels de la structure, permettant à l'architecture de poursuivre son investigation dans d'autres domaines de sa compétence.

CHAPITRE 1

Éléments de physique du bâtiment

Ce premier chapitre a pour objectif de compiler les outils essentiels de la physique du bâtiment permettant d'aller vers des solutions de confortement adaptées aux édifices existants et en établir les prédimensionnements. Les éléments présentés sont largement développés dans nombre de publications spécialisées et exhaustives, qu'il s'agisse de géologie, de physique statique ou dynamique, de sismicité, raison pour laquelle ils sont ici simplement rassemblés et condensés pour être utilisés en l'état, comme des outils convenus et déjà éprouvés.

1.1 Notions de base

1.1.1 Les efforts et les équilibres

Direction, sens et intensité : *Tout objet réel ou virtuel se déplace suivant une ligne (la direction), depuis un endroit vers un autre endroit (le sens), avec une énergie plus ou moins variable (l'intensité).*

1.1.1.1 Mouvements fondamentaux d'un bâtiment

Un bâtiment n'a pas vocation à se déplacer. Il bouge (vibre ou oscille) sur lui-même généralement sans effet sur le confort des occupants. Par gros vents ou sous l'action des véhicules circulant sur les planchers, les vibrations sont parfois plus perceptibles. En revanche, sous l'action des cyclones, des tremblements de terre ou des explosions, les oscillations deviennent plus actives, parfois jusqu'à provoquer des situations dramatiques. Le législateur a réglementé un certain nombre de dispositions constructives visant à ne pas rendre inconfortable l'utilisation des immeubles dans les conditions normales d'un programme et d'un site donnés ; il en est ainsi des joints de dilatation et de rupture, des flèches admissibles des poutres et des planchers, de l'amplitude des oscillations, des fréquences et de l'interaction des sols et des structures, de l'élasticité des matériaux tout comme de la qualité des liaisons. Les objectifs dimensionnels normalisés sont en général issus de l'observation des limites supportables au confort des hommes, tout comme des limites de déformations économiquement acceptables par les matériaux.

Le bâtiment ne devant osciller que faiblement sur lui-même, il reste à comprendre comment est prise en charge l'énergie qu'il reçoit d'une tempête ou d'un cyclone, d'un tremblement de terre ou d'une explosion. Comment reçoit-il cette énergie, comment la transforme-t-il, comment enfin la canalise-t-il et la conduit-il dans le sol par l'intermédiaire de ses fondations (Fig. 1.1)?



Figure 1.1 Recevoir, stocker, dissiper l'énergie
(Pays-Bas, Amsterdam, immeuble de bureaux, 2004).

1.1.1.2 Cheminement réactif aux sollicitations : recevoir l'énergie, la stocker et la dissiper

1.1.1.2.1 *Recevoir l'énergie*

L'image du guerrier au combat se protégeant d'un bouclier est initiatrice : il doit recevoir les coups qui lui sont portés, tout comme l'édifice ne peut échapper aux vents violents, aux charges sismiques ou aux mouvements dus à l'activité sur ses planchers.

La pression des chocs reçus sur le bouclier a été appréciée par l'observation tout au long des multiples conflits de l'histoire. Elle a permis de définir la forme du bouclier (Géométrie) afin de minimiser les effets de la réception du choc et d'en canaliser les actions au point de maintien assuré par le poignet, et la façon de l'opposer à l'adversaire : cette pression doit être reçue dans l'axe de la résistance maximale du corps du guerrier, ce par l'intermédiaire d'un jeu d'articulations portées par la géométrie du bras (Mécanique). Elle a permis de concevoir l'épaisseur des matériaux compatible avec la pression susceptible d'être reçue lors du choc, et compatible avec la durée de résistance du guerrier (Technique et technologie). Rapportées à la conception constructive d'un édifice, ces contraintes définissent les premières exigences (Fig. 1.2).

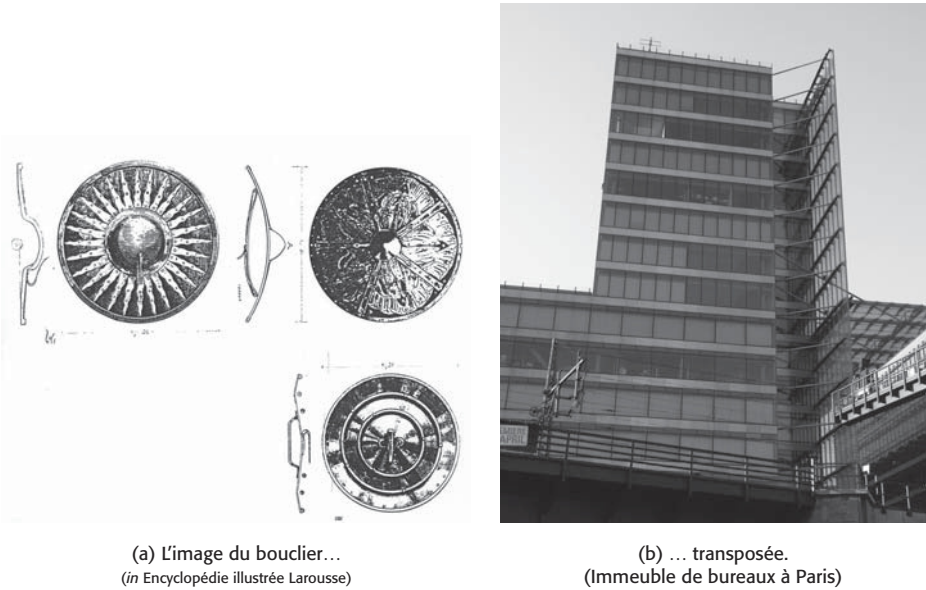


Figure 1.2 Recevoir les pressions.

La forme du bouclier

Opposer une pleine façade perpendiculairement aux vents dominants, c'est recevoir la pression maximale de l'air ; il en est ainsi au niveau de l'urbanisme des fronts de mer ouverts de plein fouet aux vents du large pour bénéficier de vues maximales. Opposer l'inertie la plus faible à la direction des charges sismiques historiquement reconnues comme les plus importantes est aussi s'exposer à des désordres faute de résistance suffisante (manque d'inertie notamment). Dans l'un et l'autre cas, il est préférable de rechercher la valeur de la tangente minimisant les actions agressives, ce que la qualité architecturale des lieux doit prendre en compte : les boucliers étaient arrondis pour que l'effet de l'impact soit amorti par le glissement du glaive (Fig. 1.3-1).

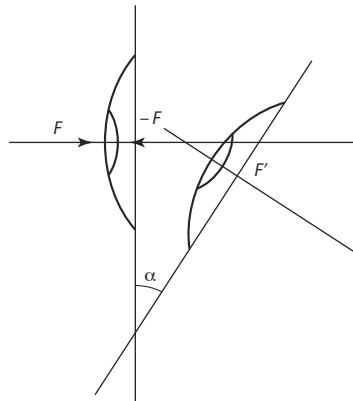
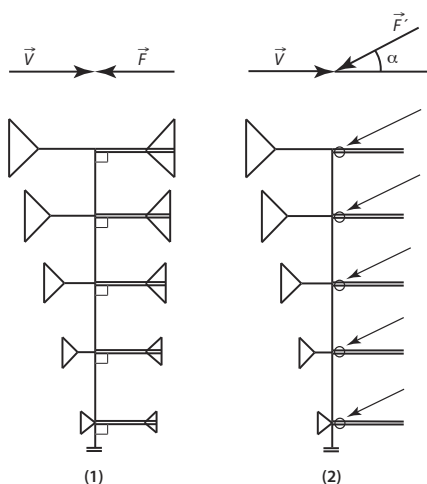


Figure 1.3-1 Orienter le bouclier pour amortir le choc : à une action (F), le soldat va opposer une réaction de même direction mais de sens opposé ($-F$). Si le soldat incline le bouclier selon un angle α , il va opposer une réaction $|F'| = |F \cos \alpha|$ où $|F'| < |F|$, donc un effort moindre pour le même résultat. Dans le premier cas, l'affrontement sur la même direction est assimilable à un encastrement, alors que le deuxième est assimilable à une articulation.

Opposer l'angle d'un édifice à un vent dominant ou à une charge sismique, c'est adopter la conception de la proue des navires. Opposer une verticalité inclinée sous le vent, c'est intégrer le CX (coefficient de pénétration dans l'air) auquel l'automobile et l'aéronautique sont depuis longtemps sensibles pour notamment limiter les consommations d'énergie ainsi que les vibrations et leurs conséquences (Fig. 1.3-2).



(a) La Santa Maria dans le port de Lisbonne



(b) Transposition au bâtiment

Figure 1.3-2 À l'inverse du bouclier ou de la voile, un bâtiment ne peut incliner sa réaction, c'est-à-dire ses planchers. Pour diminuer l'effet de la pression du vent sur la structure, deux cas se présentent.

Croquis 1 : ou bien l'immeuble doit opposer à l'action V une réaction $F = -V$, ce qui nécessite une structure rigide (lourde) et les planchers sont encastrés dans les façades.

Croquis 2 : ou bien une partie de l'énergie V est dissipée par les liaisons articulées des planchers aux façades, ce qui nécessite d'opposer une réaction moins importante selon l'angle α , soit $|F'| = |V \cos \alpha|$ où $|F'| < |V|$.

Ces réflexions sur la forme des bâtiments opposable aux charges extérieures relèvent d'une collaboration très étroite entre la conception architecturale la plus performante (la forme) et sa constructibilité. Les dessins des phares en mer ou des moulins (Fig. 1.4 et 1.5) en sont une expression presque caricaturale d'autant que leur géométrie est née d'objectifs opposés : l'un se protège du vent, l'autre en capte l'énergie.



Figure 1.4 Phare de Cordouan (estuaire de la Gironde)
(© H. Chenu)



Figure 1.5 Moulin en Hollande

Sa position

Lors du combat, le guerrier modifie sans cesse la position de son bouclier afin de présenter au glaive l'angle de choc qui en réduira les effets. Il en est de même de la voile du bateau qui est adaptée en permanence à la pression du vent afin d'en optimiser les effets dans un rapport de vitesse et de sécurité.

Si un édifice peut modifier la capacité de ses façades à capter ou à se protéger du rayonnement solaire par le jeu de brise-soleil à géométrie variable ou de verre dont la pigmentation varie, il ne peut – jusqu'à ce jour du moins – en adapter la forme continuellement et parfois rapidement. La recherche architecturale consiste à donner aux façades et, de façon plus actuelle, aux enveloppes les formes statistiquement les mieux appropriées localement aux pressions de l'air comme aux charges sismiques. Cette recherche est encore un peu éloignée des préoccupations inventives de notre époque, même si les travaux de Peter Rice en sont un signal très fort tout comme l'annonce le projet de tour pivotante de deux cent cinquante mètres de hauteur, à Dubaï (architectes, ingénieurs : Fisher, Bettazzi, Sal associés à Robertson). Pour l'heure, les premiers éléments de réponse se situent essentiellement dans les articulations aux liaisons des récepteurs (les façades) et des conducteurs (les poutres et les planchers).

La réception des chocs

Le glaive évite le choc axial sur le bouclier, dont la mobilité lui permet de décomposer l'effort reçu en une réaction frontale, rigide, simultanée à une réaction souple. L'architecture du bouclier accompagne l'habileté du guerrier. L'invention des forgerons a été de nervurer la peau du bouclier pour la raidir et pour ramener, reconcentrer les pressions sur son axe mécanique, c'est-à-dire au droit de la prise de poignet et du coude. De la même façon, la conception constructive du bâtiment cherche à concentrer les charges du vent ou des séismes sur les éléments pouvant leur opposer la plus grande résistance ; les planchers en sont au premier chef les acteurs, le « *nez de plancher* » étant le lieu de concentration des pressions reçues par les façades.

Mais tous les bâtiments n'ont pas forcément de nez de planchers à opposer, notamment dans les structures en portique de conception architecturale « organique » : ils sont alors remplacés par des poutres dont la mission essentielle est de concentrer ces pressions ; elles portent le nom de « *poutres au vent* » et sont dessinées pour centrer les charges et les acheminer vers les porteurs (Fig. 1.6a), d'où le profil qui leur est donné. Les *balcons filants* des immeubles collectifs remplissent parfois ce rôle (Fig. 1.6b).



(a) Centre Sony à Berlin
(arch. Helmut Jahn)

(b) Immeuble de logements à Berlin
(arch. Le Corbusier)

Figure 1.6 Recevoir l'énergie sur les poutres au vent et sur les nez de planchers.

Les poteaux qui reçoivent à leur tour la pression transmise par les poutres au vent sont sollicités à la flexion ; à l'instar des profils des mâts de bateaux de haute compétition, ils sont dessinés pour opposer la résistance maximale (inertie) au renversement. Aujourd'hui de plus en plus elliptique, le dessin de section avait antérieurement inventé le poteau rectangulaire avec son corollaire qu'est le « voile », un mur de faible épaisseur.

1.1.1.2.2 Stocker l'énergie

L'énergie du choc reçue par le bouclier du guerrier n'est pas destinée au bouclier mais à l'homme qui le porte. La transmission au sol n'étant pas instantanée, le guerrier va devoir stocker cette énergie pendant quelques instants et la canaliser avant de la dissiper. De la même façon, la pression du vent ou la charge sismique doit être stockée par le bâtiment pendant un certain temps, lequel se mesure en secondes, voire en fractions de seconde. Ne pas stocker ou très insuffisamment stocker conduit à vouloir transmettre quasi instantanément cette énergie au sol, ce qui est impossible en raison de l'inertie de masse, et peut provoquer le renversement ou l'implosion (ou plus couramment des vibrations sensibles). Il revient à la matière d'absorber cette énergie dans sa masse sans se déformer, avant de la conduire vers le sol.

1.1.1.2.3 Dissiper l'énergie

Une fois reçue puis stockée, cette énergie doit être « déstockée » le plus rapidement possible. Quatre cas principaux vont se présenter :

- la structure est lourde et très rigide ;
- la structure est lourde mais peu rigide ;
- la structure est légère mais peu souple ;
- ou bien la structure est légère et souple.
- **Si la structure est lourde, très rigide et homogène** (les blockhaus en béton de la côte atlantique), l'énergie est transmise quasi immédiatement au sol sans apporter de désordres particuliers hormis quelques liquéfactions au niveau du contact des armatures et du béton dues aux vibrations. Il en est ainsi des structures-poids bien construites de l'architecture des ouvrages de défense dans la Perse antique, des donjons des châteaux forts ou des fortifications de Vauban.
- **Si la structure est lourde mais peu rigide et peu homogène**, le manque de ductilité ne permet pas l'acheminement rapide vers les fondations. L'énergie est ainsi en partie dissipée par la matière sous forme de vibrations dues aux périodes désynchronisées des composants des murs et des planchers, ce qui entraîne sa liquéfaction. Le bâtiment peut alors s'effondrer sur lui-même. Pour exemple, les vestiges en brique et mortier de la porte du palais de Timour/Tamerlan (l'Ak Saray) en Ouzbékistan, dont il ne reste que quarante des soixante-dix mètres de son élévation (Fig. 1.7).
- **Si la structure est légère mais peu souple**, soit parce qu'il y a trop de liaisons encastrees, soit parce que les matériaux de structure manquent d'élasticité (bétons surdosés en ciment, poteaux en fer à trop forte teneur en carbone, poteaux acier surdimensionnés), soit les deux en même temps, soit encore parce que les sections (inertie) sont trop importantes, elle risque l'explosion (ou l'implosion). En effet, l'énergie ne pouvant être dégradée sur son cheminement vers le sol met en vibration les éléments de la structure au-delà de leur résistance au cisaillement ou à la torsion, et ils se rompent.



Figure 1.7 Les « pylônes », montants de la porte du palais de l'Ak Saray à Shahrissabz.

- ***Si la structure est légère et souple***, l'énergie va se dissiper par la mise en vibration des barres et la déformabilité des liaisons (articulations). Trop souple en revanche, elle pourra se déformer au-delà de sa limite d'élasticité (ELU) et entrer en phase plastique pour ne plus reprendre sa forme initiale.

Le déstockage induit donc deux types principaux de bâtiments : ceux qui acheminent très rapidement l'énergie dans les fondations grâce à leur masse et à leur rigidité globale, et ceux qui par leur souplesse dissipent tout ou partie de l'énergie avant que celle-ci n'atteigne le sol.

La traduction de cette observation commence par une harmonisation la (ou des) période(s) propre(s) au bâtiment (T_b) avec celle du sol d'assise (T_s), l'interaction sol/structure (ISS). Ceci a fait dire qu'en zone sismique un bâtiment rigide devait être posé sur un sol souple, mais l'inverse n'est pas aussi systématique.

1.1.1.3 Cheminement de l'énergie et prise en charge par la géométrie des structures en portique

La géométrie des portiques est l'association des deux définitions précédentes : celle qui donne les limites des conditions de la stabilité globale de l'édifice et celle qui accompagne le cheminement de l'énergie. En architecture, un portique est un plateau habitable porté par des poteaux ou/et des murs aux encombrements minimaux.

Le plateau fonctionne en trois dimensions, deux horizontales (son plan de torsion) et une verticale (sa flexion). Sur le plan horizontal, il doit rester rigide, c'est-à-dire ne pas accuser d'oscillations inconfortables même proportionnelles à la distance à son centre de gravité. Verticalement, il ne doit pas accuser de flèche supérieure aux limites de confort des habitants (généralement entre 1/100 et 1/500 de la portée selon la classe de bâtiment). Enfin, dans sa masse, le transfert d'énergie crée un mouvement vibratoire qui ne doit pas être ressenti par les occupants, d'où le besoin d'un certain volume qui ne saurait se limiter aux seuls calculs de flèche, ou d'une certaine isolation mécanique.

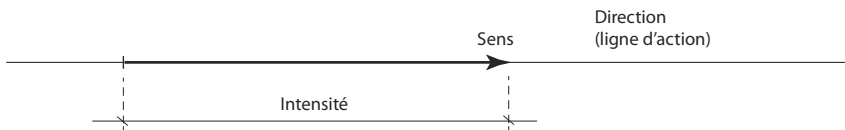
Les porteurs, poteaux ou/et murs, fonctionnent également en trois dimensions, deux sont horizontales et gèrent le balancement (les oscillations) et l'autre, verticale, a en charge les actions de compression et de tension. Le mode oscillatoire est contraint par les types de liaisons en pied et en tête (encastrement ou articulation à n degrés de liberté). Verticalement, le contrôle est effectué par les calculs à la compression ou à la tension, et par ceux qui gèrent le flambage.

Ce qui vient d'être rappelé à propos des plateaux et des porteurs laisse maintenant libre cours à la traduction architecturale dont l'histoire antique, ancienne, récente comme contemporaine fourmille d'exemples, depuis la *stoa* grecque jusqu'aux grands stades contemporains.

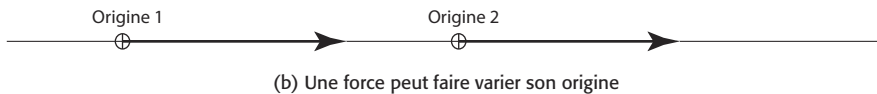
1.1.1.4 Rappel des quelques éléments fondamentaux de géométrie sur le cheminement des forces

Définitions élémentaires

En mécanique du bâtiment, le plus court chemin d'un point à un autre est la ligne droite, ce qui n'est pas vrai dans beaucoup d'autres sciences, comme en astronomie, en logistique des transports ou en balistique. Ainsi toute force doit-elle être caractérisée par trois éléments : sa direction d'action, son sens et son intensité (Fig. 1.8).

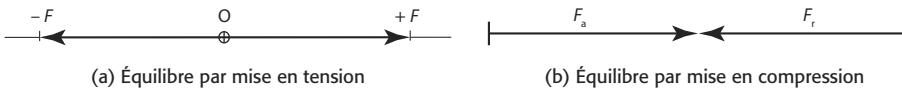


(a) Représentation graphique d'une force en direction, sens et intensité



(b) Une force peut faire varier son origine

Figure 1.8 Direction, sens et intensité.



(a) Équilibre par mise en tension

(b) Équilibre par mise en compression

Figure 1.9 F_a : action, F_r : réaction. L'équilibre peut se réaliser par opposition de deux forces de même intensité agissant sur la même direction.

Dans un bâtiment, les éléments de structure n'ont pas vocation à se déplacer sur le sol. À l'action d'une force doit être systématiquement opposée une réaction de même direction, de même intensité et de sens opposé : $F_a = -F_r$ ou $|F_a| = |F_r|$. Deux réponses peuvent être apportées : l'une se fait par tension sur l'origine O (Fig. 1.9 a), l'autre se réalise par compression sur le point de jonction (Fig. 1.9 b).

Par exemple : À un niveau donné d'un mur, au poids qui se situe au-dessus est opposé la résistance de la partie qui se trouve en dessous. Ou encore, au poids exercé par un immeuble sur le sol est opposée la résistance du terrain porteur. Il s'agit d'un comportement en compression. À l'inverse, une toile tendue le restera si elle est soumise à un jeu équilibré de tensions.

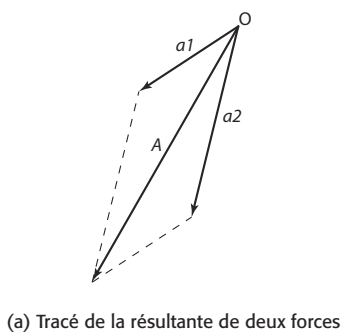
Ainsi, pour annuler les risques de renversement d'un édifice ou limiter ses oscillations sous charges horizontales (le vent, les tremblements de terre...), il faut opposer à une force active F_a une force réactive F_r de sorte que $|F_a| = |F_r|$. Comme cette situation n'est possible qu'avec les structures-poids face aux vents, la mécanique a inventé dans les autres situations une équation d'équilibre qui fait intervenir d'autres paramètres et dont l'équation s'écrit : $|Ma| = |Kx|$ où M : masse de l'édifice¹, a : accélération à laquelle il est soumis, K : rigidité de la structure du bâtiment, x : déplacement horizontal, soit par niveau, soit au sommet selon les degrés de liberté qui lui sont attribués.

Une force considérée comme la résultante de deux autres forces

Un bâtiment est sujet à des forces verticales que sont le poids propre de ses matériaux, des charges d'occupation portées par les planchers et certaines charges climatiques comme la neige une fois posée sur la toiture. Il est également sollicité par des forces qui ne sont pas verticales telles que le vent, les tremblements de terre, les missiles éventuels ou encore les charges mobiles internes que sont les véhicules dans les parkings ou les ponts roulants par exemple. La structure doit prendre en charge aussi bien les forces verticales que celles qui ne le sont pas, et les combiner de sorte que leurs résultantes au contact du sol porteur soient verticales afin d'obéir aux exigences des lois de la gravitation terrestre.

Par convention, toutes les forces non verticales appliquées sur un édifice sont réputées horizontales ou ramenées à l'horizontalité, même si le vent exerce une pression d'angle très variable sur les façades ou que les ondes sismiques de cisaillement (S) ne se déplacent pas à la surface du sol mais suivent la direction des ondes primaires (P) responsables des soulèvements.

Pour arriver à résoudre le problème de la combinaison de toutes ces forces de directions, de sens et d'intensités différents, la physique a inventé les *résultantes*. Deux forces situées sur un même plan finissent par se rencontrer (même à l'infini si elles sont parallèles). Leur point de concours est le départ de leur résultante. Celle-ci se dessine comme la diagonale d'un *parallélogramme des forces*. Sur la figure 1.10 a, A est ainsi la résultante des deux forces $a1$ et $a2$.



(a) Tracé de la résultante de deux forces



(b) Une barre de contreventement est une résultante (immeuble de commerces en R+0 et d'appartements à Amsterdam, 2004)

Figure 1.10

1. Les calculs font toujours référence au concept de masse (M). Le poids d'un ouvrage est le produit de sa masse par l'accélération du sol : $P = Mg$; une charge réputée horizontale – ce qui est le cas en première approche dans les calculs du bâtiment, qu'il s'agisse de vent ou de séismes – est le produit de la masse par l'accélération qui la meut : $F = Ma$. En sismicité on ne sait calculer la pression reçue par un édifice alors il est procédé à l'inverse; on considère qu'il peut résister à une force déclinée de son poids et qui s'écrit : $F = Pa/g$.

L'observation d'une démarche peut être expliquée ici : lorsqu'un bureau d'études prend en charge un avant-projet d'architecture, il le vérifie en termes de « descentes de charges ». Il prend en effet en compte toutes les charges auxquelles sera soumis l'édifice depuis son sommet jusqu'au sol d'assise, en simule le cheminement et s'inquiète de la façon dont les résultantes qui seront matérialisées par les porteurs (murs ou poteaux) arriveront verticalement sur le sol. Son raisonnement est celui d'une « force active » (F_a). Lorsqu'un architecte conçoit un projet neuf ou étudie la stabilité d'un ouvrage existant, il a la démarche inverse : une fois le dessin esquissé, il se préoccupe de remonter les comportements mécaniques de la structure, de la fondation jusqu'au sommet, à partir de la verticalité des porteurs sur les assises. Son raisonnement est celui d'une « force réactive » (F_r).

Ainsi, en archéologie ou en confortement de bâtiments existants, lorsqu'il s'agit de comprendre comment ne s'est pas effondré ou renversé un édifice, il faut partir de son assise et mesurer l'inclinaison des porteurs sur la verticale. Le cheminement des forces est ensuite remonté jusqu'au sommet de l'édifice en recherchant où se sont produits les efforts et les vulnérabilités (déformations) qu'ils ont engendrés sur la structure. Plus particulièrement en archéologie lorsque les vestiges sont ténus, la reconstitution hypothétique se fait en remontant les descentes de charges du sol vers le sommet de l'édifice.

La résultante des résultantes

Dans un bâtiment cohabitent beaucoup de forces de directions, sens et intensités divers. Il faut donc les combiner pour obtenir une résultante finale qui soit verticale sur le sol. La physique a inventé la résultante des résultantes. En effet, si deux forces peuvent se combiner selon un parallélogramme dont elles forment les côtés (les composantes), deux résultantes peuvent faire la même chose (Fig. 1.11-1). Les forces A et B sont deux résultantes, la première provenant de deux forces $a1$ et $a2$, la seconde de deux autres, $b1$ et $b2$. À elles deux, elles peuvent former un nouveau parallélogramme dont la diagonale sera la résultante R .

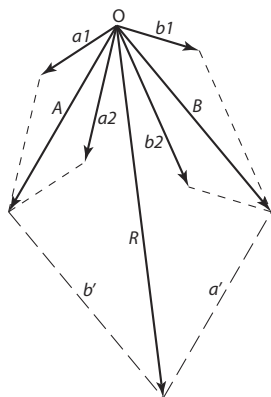


Figure 1.11-1 Tracé de la résultante des résultantes.

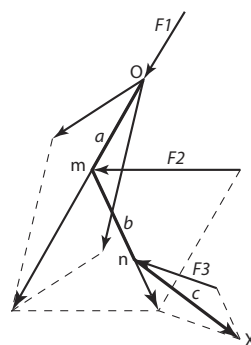


Figure 1.11-2 Initiation au cheminement des forces.

Les forces $a1$, $a2$ et $b1$, $b2$ ont l'avantage de concourir en un seul point O , ce qui dans le bâtiment n'est pas toujours le cas.

En effet (Fig. 1.11-2), une force $F1$ appliquée en un point O peut se décomposer en deux forces dont la résultante est de direction a axée sur celle de $F1$. Avant qu'elle ne soit entièrement « dessinée », vient s'appliquer en m une autre force $F2$. Celle-ci à son tour va se combiner

avec a pour donner une résultante b . Qu'une nouvelle force $F3$ intervienne en n sur la ligne b , elle va se combiner avec et former une nouvelle résultante c . La ligne $OmnX$ marque le cheminement que prennent les différentes sollicitations auxquelles l'édifice est soumis et s'appelle le *polygone funiculaire*. (Cet article n'ayant pas vocation de cours de physique ou de mécanique, le lecteur se référera aux traités qui les développent, d'autant qu'une reprise d'explication serait évidemment théorisée et sans doute assez éloignée de ce qui se rencontre régulièrement dans les bâtiments.)

Pour cette raison, il est préféré montrer comment le phénomène s'applique sur un bâtiment courant (Fig. 1.12).

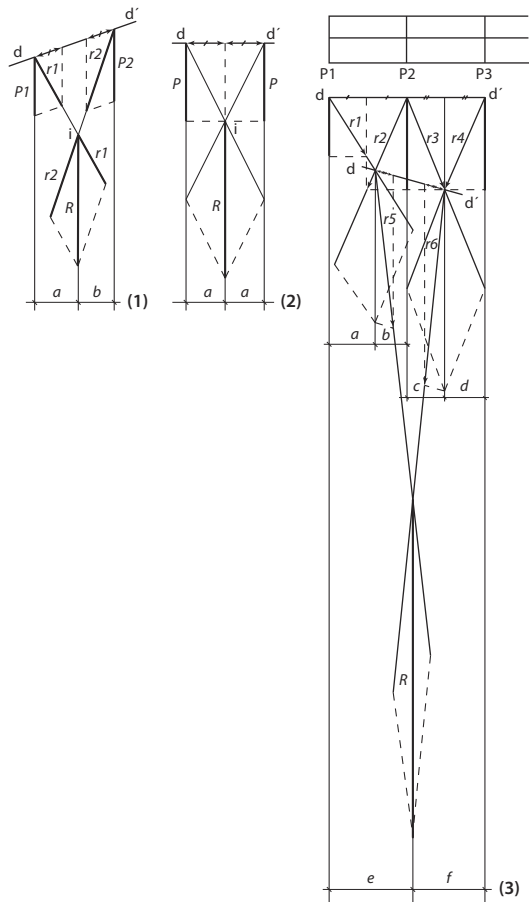


Figure 1.12 Construction géométrique de la résultante de plusieurs forces.

Au préalable, une courte explication: imaginons deux poteaux d'un portique, parallèles, verticaux descendant respectivement des charges différentes, $P1$ pour l'un, $P2$ pour l'autre. Comment construire leur résultante (Fig. 1.12, 1)? Tracer les deux axes verticaux des poteaux et les recouper par une ligne quelconque dd' . Sur cette ligne et depuis le sommet de chaque poteau, délimiter un segment de même longueur. $P1$ ou $P2$ combinés avec chacun de ces deux segments permettent de dessiner deux parallélogrammes avec respectivement leurs diagonales $r1$ et $r2$. Ces deux diagonales vont se couper en un point qui sera le sommet d'un

nouveau parallélogramme qui à son tour va dessiner une résultante R . Cette résultante R se situe à la distance a du poteau P1 et b du poteau P2. Par ailleurs sur le dessin, P1 comme P2 ont été tracés à l'échelle des masses qu'ils portent : par exemple 1 cm pour 1 tonne (force). Pour savoir quelle est la valeur de la résultante, il suffit de la mesurer à la règle graduée et de transformer la longueur en force.

La figure 1.12, 2 présente deux poteaux chargés de la même façon, ce qui est fréquent dans les bâtiments neufs. Au lieu de prendre une direction quelconque pour la ligne dd' , il suffit de la prendre horizontale, figurant ainsi un plancher et de procéder comme indiqué précédemment. La résultante R est évidemment verticale et sa valeur est égale à deux fois la charge portée par chaque poteau.

C'est la même démarche qui va permettre de définir la direction, le sens et l'intensité de la résultante des descentes de charges de trois poteaux, celui de l'extrémité de l'immeuble étant chargé $P1$, valeur inférieure aux charges des deux autres $P2$ et $P3$ par ailleurs égales : $P1 < P2$ ou $P3$ et $P2 = P3$ (Fig. 1.12, 3). La résultante R est de direction verticale, orientée vers le sol et sa valeur se mesure à la règle graduée au même titre qu'ont été tracées les valeurs des charges de P1, P2 et P3 sur une échelle de correspondance entre les centimètres et les tonnes-force. Cette résultante se situe à la distance e de l'axe du poteau P1 et à f de l'axe du poteau P3.

Deux méthodes existent pour déterminer R . L'une vient d'être exposée, elle est géométrique, compréhensible par tous mais parfois un peu longue lorsqu'il y a beaucoup de porteurs. L'autre est algébrique, plus rapide mais souvent moins accessible à qui n'est pas habitué à ce type de manipulation (comme évoqué précédemment, le traitement par le mode algébrique est développé dans les manuels de physique).

À quoi sert d'établir cette résultante ? Tout immeuble a un axe de gravité vertical qu'il est nécessaire de connaître afin de déterminer ensuite la position de sa torsion, l'idéal étant que cet axe de gravité vertical soit aussi l'axe de torsion vertical.

Recherche des réactions aux appuis

Qu'est-ce qu'un appui ? C'est l'endroit (le point) où une poutre rencontre un mur ou un poteau pour se faire porter, où un poteau rencontre une fondation, où un entrain de charpente ou de portique vient rencontrer un mur ou un poteau de support. Ce contact suscite une réaction du porteur au moment où il doit porter la poutre ou le plancher. Cette réaction n'est pas seulement verticale et chacun peut le comprendre en se remémorant comment son corps se comporte au moment où il se charge d'un sac à dos, tout comme il va devoir s'ajuster en permanence aux mouvements liés à la marche pour garder son équilibre. Les bretelles du sac à dos sont les organes de liaison du sac au corps (les appuis). L'appui de la poutre ou du plancher sur le mur ou le poteau joue le même rôle. Les bretelles du sac ont été dessinées pour assurer la liaison la plus stable et la plus confortable avec le dos du porteur. Les liaisons des poutres avec les poteaux doivent être dessinées pour assurer au mieux la stabilité, c'est-à-dire l'équilibre. Pour cela, il faut savoir comment réagissent le poteau ou le mur à la charge qu'ils reçoivent sachant que, contrairement au corps humain portant le sac à dos, ils ne peuvent en permanence adapter leurs formes : celles-ci sont dessinées une fois pour toutes.

Comment chercher les réactions aux appuis, c'est-à-dire quel est le dessin de la liaison le mieux approprié pour garantir l'équilibre sous les mouvements du bâtiment ? S'agira-t-il d'un encastrement ? d'une articulation ? Faudra-t-il chercher une solution mixte ? La physique a inventé un moyen d'apprécier la direction, le sens et l'intensité de l'action (F_a) d'un porté sur

un porteur, ce qui permet de dessiner la réaction (F_r) du porteur à sa liaison avec le porté. À nouveau, le lecteur se référera aux manuels de physique qui expliquent soit par la géométrie soit par le calcul comment s'établissent les actions et les réactions aux liaisons. Si nous n'avons pas repris cette explication dans cet article, c'est tout simplement parce que la démarche de conception constructive par un architecte n'est pas une démarche technologique. En revanche, pour un industriel, la démarche est technologique et dimensionner les plaques métalliques et les sections des boulons ou la résistance d'une soudure pour faire un encastrement ou une articulation, d'une liaison d'une poutre avec un poteau, passe obligatoirement par l'établissement des actions/réactions et leurs traductions quantifiées.

Pour un architecte qui doit avoir une vision globale de la stabilité de l'immeuble neuf qu'il conçoit ou qu'il étudie s'il est déjà édifié, la démarche peut être imagée en prenant l'exemple d'un bâtiment existant, en l'occurrence une cathédrale gothique (Fig. 1.13).

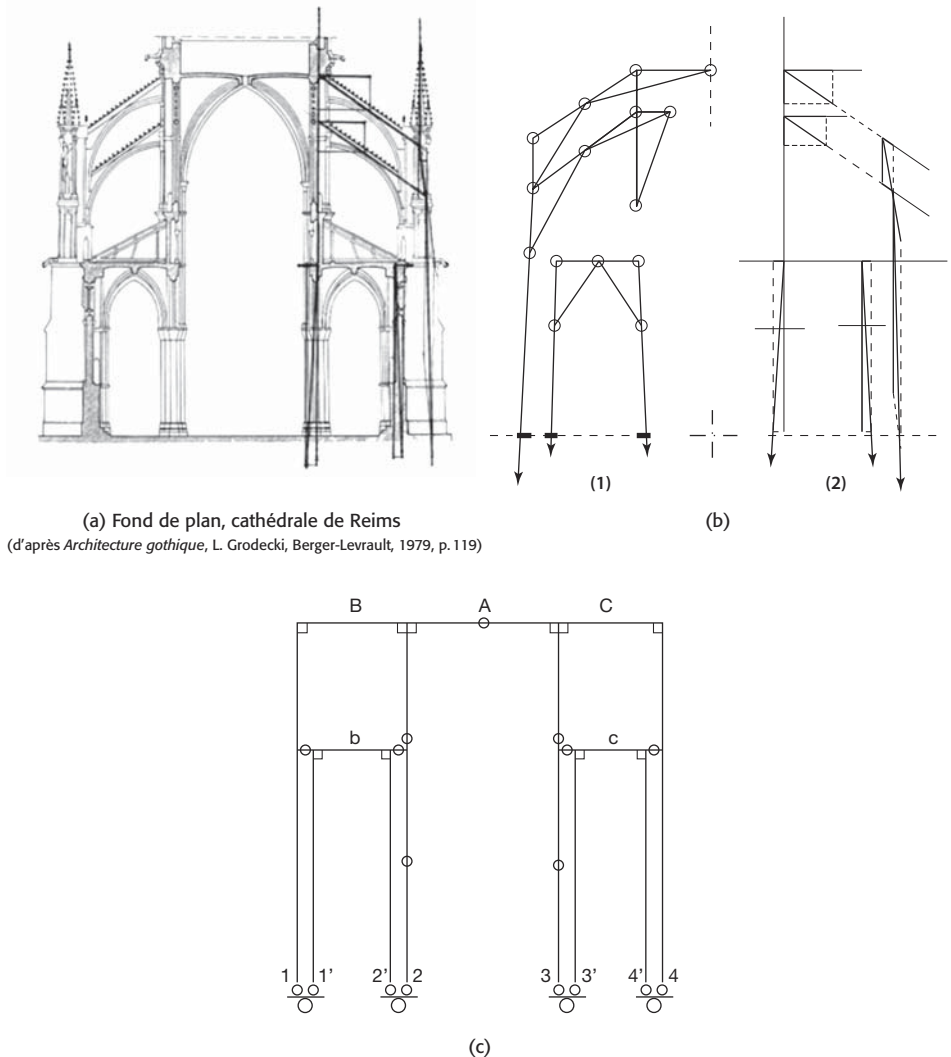


Figure 1.13 Analyse des liaisons sur un bâtiment existant.

L'architecte contemporain comme celui du xii^e siècle doit faire en sorte que la résultante de toutes les charges tombe au centre de la section du porteur. Au xii^e s., elle devait se situer dans le tiers central de l'assise. Il fallait commencer par situer ce tiers central et l'axer sur une verticale. De plus, la résistance du terrain étant connue, on savait a priori ce qu'allait être l'encombrement de la fondation, donc les dimensions des assises au niveau du plancher et donc les écartements des porteurs définis par le programme du maître d'ouvrage. S'en déduisait ainsi la quantité de matériaux que pouvait supporter chaque porteur, et par conséquent la hauteur des murs. Rappelons qu'un bâtiment s'édifie du bas vers le haut. On pouvait ainsi esquisser le profil en travers de l'ouvrage (Fig. 1.13 a).

Il fallait ensuite organiser le cheminement des charges depuis la fondation jusqu'à la voûte de la nef centrale (Fig. 1.13 b, croquis 2 à droite) et enfin traduire ce cheminement en termes de liaisons sachant qu'il n'en existait qu'une seule, l'articulation, mais que dans un plan donné trois articulations font un encastrement (Fig. 1.13 b, croquis 1 à gauche). Il est vraisemblable que les architectes des cathédrales savaient modéliser le jeu des barres et des liaisons, avant de formaliser (Fig. 1.13 c).

Prenons maintenant le cheminement inverse. Le maître d'ouvrage impose la largeur des nefs, la hauteur des bas-côtés et celle de la nef principale. Le concepteur va alors essayer plusieurs modèles (Fig. 1.14).

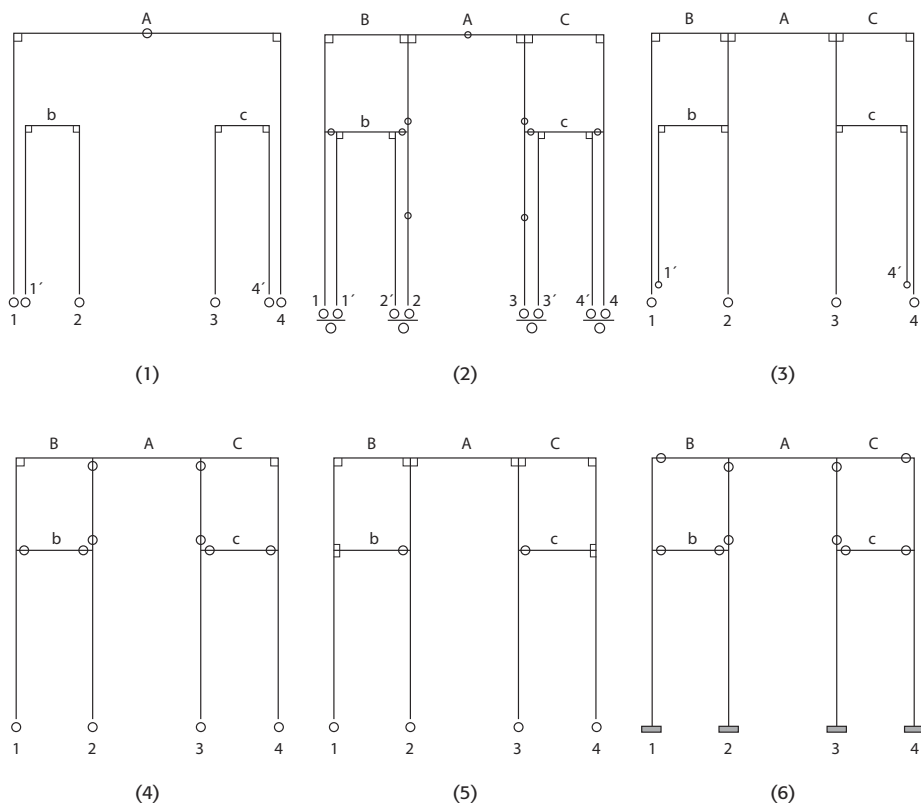


Figure 1.14 Exemples de recherche de la conception globale de la stabilité sur un profil en travers de cathédrale gothique.

Par exemple, faire un portique principal constitué de deux poteaux articulés en pied puisque simplement posés sur le sol, et d'une poutre encastrée en leurs sommets : cette poutre sera évidemment une voûte (un arc) donc un système nécessitant une articulation au centre compte tenu de sa portée, en somme un arc à trois articulations. Quant aux deux bas-côtés, ils pourront être conçus respectivement comme un portique articulé en pied et reliés par une poutre encastrée en leurs sommets (Fig. 1.14, 1). Il peut aussi imaginer la construction de deux portiques (B et C) totalement indépendants l'un de l'autre, à l'intérieur desquels seront installés respectivement un portique b et un portique c, également totalement indépendants non seulement l'un de l'autre mais aussi du portique qui les enveloppe (Fig. 1.14, 2). Dans ce cas, la nef sera recouverte d'un plafond, fût-il une voûte reposant sur les porteurs B et C. L'architecture gothique anglaise a largement retenu ce modèle. Cette situation est isostatique.

C'est alors que se pose le problème des liaisons. Il est évident qu'existe un certain nombre de solutions et n'en ont été retenues que deux pour l'explication (Fig. 1.14, 3/4). Dans la solution (3), le grand portique initial porté par les poteaux 1 et 4 devient hyperstatique par la présence des poteaux 2 et 3 qui, par économie ou polysémie de fonctions, porteurs des petits portiques des bas-côtés, vont venir soulager la grande poutre reliant les poteaux 1 et 4. Ces poteaux 2 et 3 en s'allongeant vont être confrontés au problème du flambage. Deux solutions : ou bien en augmenter l'inertie (section), ce qui va encombrer l'espace et augmenter la surcharge sur le sol... à moins d'en diminuer la hauteur voulue par le maître d'ouvrage ; ou bien le raidir par des nœuds intermédiaires. Les petits portiques (b et c) ont été conçus initialement pour être encastrés au sommet et articulés en pied. Interposer un nœud d'encastrement sur le parcours des poteaux 2 et 3, c'est donner beaucoup de rigidité à la partie supérieure de la colonne, déjà la plus courte, et donc faire dissiper l'énergie sur la partie inférieure, la plus longue, avec les cisaillements voire les torsions potentiels. Du reste, le même problème pouvait se poser pour les poteaux 1 et 1' d'une part et 4 et 4' d'autre part, ceux-ci pouvant être regroupés respectivement en un seul mais avec une liaison encastrée des poutres b et c. En réalité pour ce deuxième problème, la solution a été trouvée en dédoublant techniquement les poteaux 1 et 4 en deux poteaux, 1 et 1' et 4 et 4', par le jeu de colonnes regroupées mais indépendantes.

Comment éliminer le problème de la trop grande rigidité des piliers 2 et 3 en partie haute (Fig. 1.14, 4) ? Une première solution a été de remplacer la liaison encastrée initiale des poutres b et c par une liaison articulée, en adoptant la même solution qu'avec les poteaux 1 et 4, c'est-à-dire en dédoublant techniquement les piliers 2 et 4 comme ce qui était initialement envisagé dans la solution de la figure 1.14, 2. Cette solution imposait que les liaisons des poutres b et c respectivement avec les piliers 1 et 4 soient également articulées. La stabilité de l'ensemble devenait alors fragilisée non pas par conception générale mais en raison des cisaillements liés directement à la technologie de mise en œuvre des pierres ou des briques. Il fallait donc rapporter de la raideur, mais où ?

L'idée a été de reprendre la figure 1.14, 2 et de transformer la poutre du grand portique en trois poutres B, A, C dont les appuis seraient encastrés au sommet des porteurs. Cette solution convenait bien aux colonnes de la nef centrale, 2 et 3, si ce n'est que la position des liaisons des poutres b et c, articulées certes mais d'inégales répartitions en dessus et en dessous, continuait de solliciter la partie basse plus fortement que la partie haute (Fig. 1.14, 5). En revanche, les liaisons des poutres b et c avec les porteurs 1 et 4 devenant des encastresments pour apporter plus de rigidité, ces porteurs allaient être très fortement sollicités et notamment

en partie basse. Il restait une solution : augmenter leur inertie, c'est-à-dire mettre de la matière, ce qui a été fait sur tous les supports des contreforts. Quant à la partie supérieure des piliers 1 et 4, elle perdait sa situation de poteau long pour devenir un « cadre rigide » par encastrement à ses extrémités et à sa liaison au niveau vertical/horizontal. Trois encastresments sur un demi-portique, c'est beaucoup, et le boutant qui allait naître de ce cheminement allait également éliminer l'encastrement central en se mettant en pente. Cependant surgissait un autre problème : les poutres b et c ne pouvaient être encastrees à une extrémité et articulées à l'autre au risque de prendre un profil dissymétrique alors qu'elles allaient être réalisées en arc.

La dernière solution était donc d'articuler les poutres b et c à leurs extrémités. Deux conséquences : l'une pour les colonnes de la grande nef, 2 et 3, mais déjà en grande partie résolue comme vu précédemment ; l'autre concerne les piliers 1 et 4 dont l'inertie venait d'être augmentée, et qu'il allait encore falloir majorer pour résister au flambage. Ceci explique pour une grande partie que certains piliers porteurs des boutants semblent démesurément importants.

Cette solution ne saurait suffire (Fig. 1.14, 6). En effet, pour élever un peu plus la hauteur des nefs et surtout celle de la nef principale – puisque c'est sur ce critère que les pouvoirs religieux et politiques de l'époque affirmaient leur puissance –, il fallait revenir sur la stabilité des porteurs et en particulier de ceux des colonnades supportant la voûte de la grande nef. L'idée a été d'inverser la conception constructive générale : les poutres B, A et C ne seraient plus encastrees sur les sommets des porteurs mais articulées. Dans ce cas, les pieds des piliers 1, 2, 3, 4 devraient être encastres. Le poids d'abord allait être une réponse parce que son augmentation, liée à la recherche du « toujours plus haut » des voûtes des nefs, pouvait en conférer les propriétés. Mais si le poids augmente, il faut que le terrain puisse le supporter. La solution de faire des fondations encore plus larges avait ses limites en raison des interférences des courbes d'isopression, ce qui en diminuait la résistivité. Il a donc fallu fonder plus profondément pour aller chercher un sol plus résistant, en espérant ne pas rencontrer une nappe phréatique trop épaisse, un karst, une rivière souterraine ou un changement de structure géologique moins porteuse en profondeur.

Si la solution d'encastrer en pied n'allait pas sans conséquences sur la stabilité générale, comme observé à la cathédrale de Bourges par exemple, il restait de revenir à l'idée initiale de considérer tous les pieds des porteurs articulés tandis que les poutres seraient encastrees en leurs sommets. Il fallait alors trouver une solution pour les liaisons de b et c avec les quatre porteurs, puisque les petits portiques des bas-côtés devaient également être encastres au sommet, ce qui n'était plus compatible avec la stabilité des grands porteurs 1, 2, 3 et 4 (rappel : Fig. 1.13 c). Deux réponses techniques ont été apportées : l'une concerne la liaison des poutres b et c avec les porteurs respectifs 1,2 et 3,4 en installant une articulation intermédiaire par suppression du harpage au profit d'un accollement (ce qui explique en partie les fissures verticales aujourd'hui visibles dans les édifices ayant adopté cette solution) ; l'autre a été un perfectionnement du comportement des colonnes 2 et 3 en introduisant une articulation supplémentaire au niveau bas afin de tiercer la courbe de déformation, apportant ainsi un peu plus de souplesse. Cette invention est à l'origine du triforium.

Les liaisons

Chaque objet dans l'espace possède trois degrés de liberté conventionnellement situés dans les trois dimensions, deux en plan L_x et L_y , et une à la verticale de ce plan, L_z . Un ensemble de n objets possédera donc $3n$ degrés de liberté. Une structure est composée d'un certain nombre

d'objets qui ont pour vocation d'être assemblés et qui dans le bâtiment s'appellent des poteaux, des murs, des poutres, des planchers, des escaliers et autres. Ces assemblages d'objets que l'on appelle des *barres* se font à l'aide de liaisons que l'on appelle des *nœuds*. Telle est la transposition du vocabulaire des physiciens à celui des concepteurs de bâtiments.

La façon dont ces nœuds, ces liaisons, sont réalisés est de deux types : par encastrement et par articulation.

En réalité, ces définitions ne sont pas aussi strictement restrictives, ne serait-ce que parce que les technologies propres à chaque matériau ne le permettent pas. Ainsi, faire un encastrement d'une poutre en bois dans un mur en maçonnerie est irréalisable et que, pour y parvenir, il faudrait recourir à des artifices de triangulation visant à rendre indéformable cette liaison qui est à l'origine articulée.

Encastrement (Fig. 1.15)

Un poteau, un mur, une poutre, un arc, un plancher ou une voûte sont encastrés dans un poteau, un mur, une poutre, un arc ou une autre voûte, lorsque la liaison est rigide, c'est-à-dire indéformable dans les trois dimensions (L_x , L_y et L_z). Les physiciens disent que, pour faire un encastrement d'un objet dans un autre (d'une poutre dans un poteau par exemple), il faut supprimer les trois degrés de liberté.

Deux sigles dessinés conventionnels l'expriment : un petit carré ou un petit triangle entre deux barres de la superstructure (Fig. 1.15, 1/1'), et une petite barre horizontale avec des rayures (ou sans rayure) pour une liaison d'un mur ou d'un poteau avec le sol (Fig. 1.15, 2). Pour exemple, en statique, un « portique » dont les liaisons seraient encastrées se déforme sous l'action d'une charge verticale selon l'image 3' de la figure 1.15. En dynamique, ce même portique va se déformer sous l'action d'une charge horizontale selon la figure 1.15, 3". Les images 3' et 3" montrent qu'en se déformant les poteaux comme les poutres conservent leurs liaisons indéformables. Ceci signifie que toute l'énergie apportée par les forces F doit être prise en charge par les barres seules.

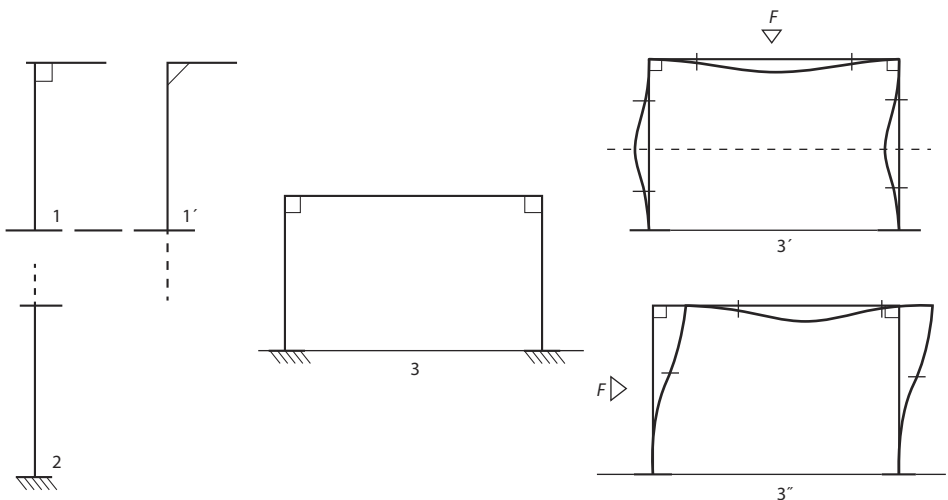


Figure 1.15 Les liaisons encastrées.

Articulation (Fig. 1.16-1)

Un poteau, un mur, une poutre, un arc, un plancher ou une voûte sont articulés sur un poteau, un mur, une poutre, un arc ou une autre voûte lorsque la liaison est déformable dans une ou deux directions.

Une articulation peut être libre dans une sphère à 360° : il s'agit alors d'une rotule (ce qui n'existe pas dans les structures des bâtiments même si le mot est souvent retenu, notamment en sismique). Elle est généralement brimée dans une ou deux directions de façon à réorienter les pressions et les tensions exercées par les barres. Les physiiciens disent que, pour faire une liaison articulée entre deux objets, il faut supprimer 2 degrés de liberté, ce qui autorise une translation dans une seule direction (rouleau). On peut supprimer un seul degré de liberté, ce qui permet un mouvement de la liaison dans deux directions contiguës.

Deux sigles dessinés conventionnels expriment l'articulation d'un objet sur un autre (une poutre sur un poteau par exemple) : un petit rond à l'extrémité articulée d'une barre (Fig. 1.16-1, croquis 4/4'), ou un petit triangle s'il s'agit d'une liaison d'un porteur avec le sol (Fig. 1.16-1, 4'') – ce petit triangle peut être remplacé par un petit rond. En statique, sous l'effet d'une charge verticale, un portique dont les liaisons seraient articulées se déforme par exemple selon le croquis 5'. En dynamique, ce même portique sous l'action d'une charge horizontale se déforme selon le croquis 5''. Les croquis 5'/5'' montrent qu'en se déformant les poteaux comme les poutres conservent la déformabilité de leurs liaisons. Ceci signifie que toute l'énergie apportée par les forces F est prise en charge à la fois par les barres et par les liaisons, ce qui minimise la participation des barres et donc leur inertie.

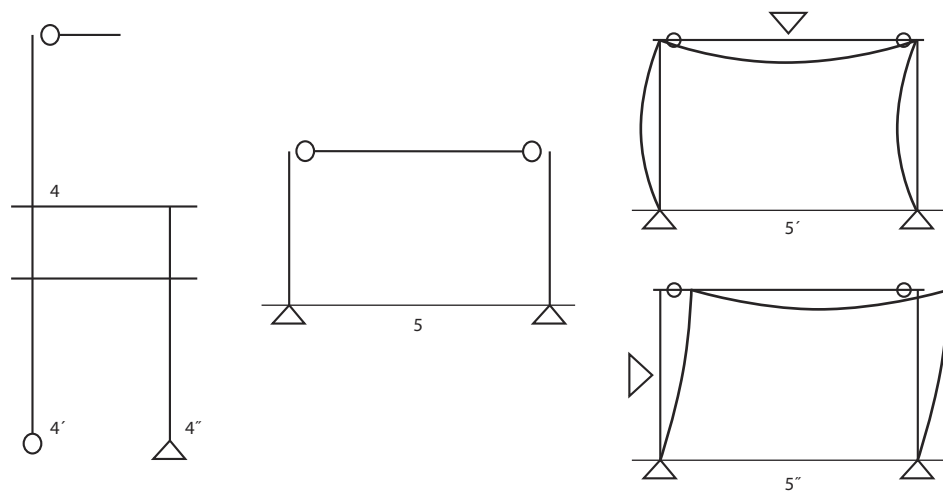


Figure 1.16-1 Les liaisons articulées courantes.

Il existe deux variantes au concept de liaison articulée et les professionnels préfèrent parler d'appuis plus que de liaison articulée (Fig. 1.16-2) :

- *L'articulation en rouleau* permet à une liaison de se déplacer sur quelques millimètres ou centimètres, dans une direction donnée (Fig. 1.16-2a, croquis 6). Cette disposition permet d'absorber les dilatations en limitant la déformation d'une structure. Généralement, elle est utilisée aux liaisons des poteaux porteurs avec leurs fondations. L'histoire des dispositions parasismiques a eu recours à cette technique pour accompagner sans les déformer les liaisons des poutres et des poteaux, comme des murs et des fondations.

- *L'appui glissant* qui assure la même fonction que précédemment sous une autre technologie de mise en œuvre se matérialise de deux façons : l'une est le pivotement d'un pied de porteur sur sa fondation ; l'autre est l'ovalisation du passage d'un boulonnage par exemple. Chacune de ces technologies est évidemment liée intimement aux possibilités de chaque matériau (Fig. 1.16-2 a, croquis 7).

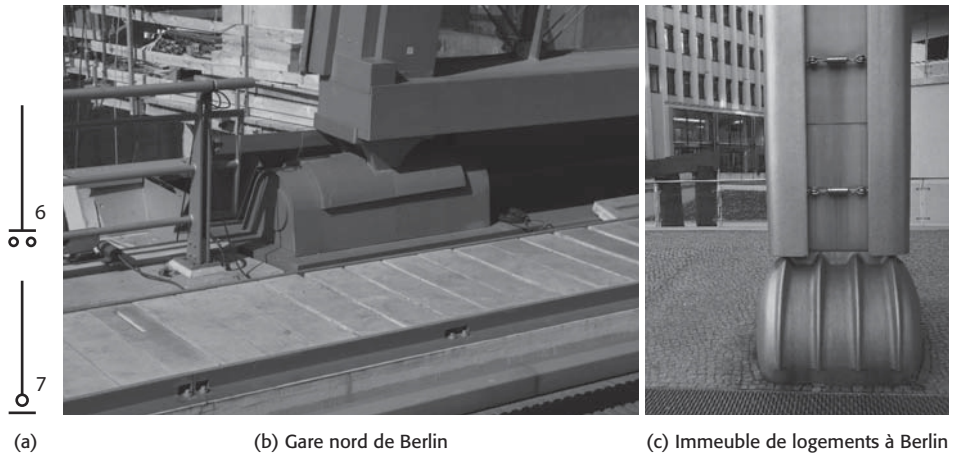


Figure 1.16-2 Liaisons articulées dans le plan de l'arc.

Les liaisons et la stabilité des structures

Cet article ne saurait être développé ici puisque la stabilité des structures, tant dans le domaine de la statique que de la dynamique, est une science en soi qu'accompagne, pour sa mise en œuvre, la résistance des matériaux. Pour clarification, la **résistance des structures** concerne l'organisation de barres (des murs, de poteaux, de poutres, de planchers et autres), de coques (planchers) et de nœuds (les liaisons des barres entre elles) de façon à rendre un édifice sinon complètement indéformable, du moins déformable dans les limites de la réversibilité, tout en respectant le confort des habitants, ou au pire leur intégrité, dans les cas de tremblements de terre. Quant à la **résistance des matériaux**, elle concerne le dimensionnement de chaque barre, de chaque coque et de chaque nœud en fonction des caractéristiques mécaniques et chimiques des matériaux retenus pour construire la structure. Ce savoir suit la première démarche dont la conclusion a été de définir les sollicitations en 3D auxquelles sont soumis tous les constituants de la structure (coques, barres et nœuds) tant dans le domaine statique que dynamique. Elle peut alors la dimensionner ; elle ne saurait bien entendu s'y suppléer même si certains usages emploient une expression pour l'autre.

À propos de la détermination des efforts dans les barres par la méthode Cremona

Avant d'être ministre de l'Instruction publique dans le gouvernement italien en 1898, Luigi Cremona était professeur à l'université de Bologne puis directeur de l'école d'application des ingénieurs. Au milieu du XIX^e s. et bien que nombre de mathématiciens et de physiciens eussent déjà ouvert la route des calculs appliqués, la géométrie était la base de toute démarche permettant d'estimer les valeurs des efforts dans les structures. Cremona avait inventé une méthode qui porte son nom et qui permet ces calculs avec seulement une règle graduée, un té et une équerre. Nombre de ponts et de structures en portiques furent ainsi calculés. Dans les années 1920, une autre méthode à partir des sections fut inventée et les ingénieurs la firent