

Mario Salvadori  
Matthys Levy

# Pourquoi ça tombe ?

*Traduit de l'anglais par Milan Zacek*

/ Mario Salvadori, Matthys Levy — Pourquoi ça tombe ? / ISBN 2-86364-653-3

[www.editionsparentheses.com](http://www.editionsparentheses.com)

Éditions Parenthèses

## Couverture :

Illustration d'après Katsuhiko Otomo, *Akira* (Éditions Glénat).

## Remerciements :

En plus de tous ceux que nous pourrions malheureusement oublier, nous tenons à remercier les amis dont le nom suit. Ils nous ont aidés à porter ce livre jusqu'à sa publication. Nous les citons par ordre alphabétique qui ne doit pas être interprété comme une hiérarchie de notre gratitude.

Edwin F. Barber, notre patient, amical, encourageant et très professionnel éditeur

Mindy Hepner, notre experte en traitement de texte, qui nous a permis de respecter le calendrier

Julie Hubley Levy, critique compréhensive, soutien enthousiaste et aimable Landon Prieur, le bibliothécaire de Weidlinger Associates, qui a su retrouver des sources d'information essentielles

Carol B. Salvadori, éditrice et correctrice privée de l'un d'entre nous, qui a traduit en anglais correct tous les chapitres italianisants de ce livre Erica Vogt et Midge Esterman, nos extraordinaires secrétaires chez Weidlinger Associates, qui ont réussi l'exploit de mettre en forme cet ouvrage.

COLLECTION PUBLIÉE AVEC LE CONCOURS  
DE LA RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR.

LIBRAIRIE DE L'ARCHITECTURE ET DE LA VILLE  
PUBLIÉE AVEC LE CONCOURS DU MINISTÈRE DE LA CULTURE  
ET DE LA COMMUNICATION  
(CENTRE NATIONAL DU LIVRE ET DIRECTION DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE).

TITRE ORIGINAL : *Why Buildings Fall Down*  
COPYRIGHT © 2002 BY MATTHYS LEVY AND THE ESTATE OF MARIO SALVADORI.  
COPYRIGHT © 1992 BY MATTHYS LEVY AND MARIO SALVADORI.  
ILLUSTRATION COPYRIGHT © 1992 BY KEVIN WOEST.  
COPYRIGHT © W.W. NORTON & COMPANY, 1992, 1994, 2002.  
COPYRIGHT © 2009, POUR LA VERSION FRANÇAISE, ÉDITIONS PARENTHÈSES  
www.editionsparentheses.com

ISBN 978-2-86364-653-3 / ISSN 1279-7650

# Préface

Il était quasi inévitable qu'après avoir écrit un ouvrage intitulé *Why Buildings Stand Up (Comment ça tient ?)*, je sois incité par mes amis (et mon cher éditeur et ami Edwin Barber) d'en écrire un second, intitulé *Why Buildings Fall Down (Pourquoi ça tombe ?)*.

J'ai cédé à la tentation d'expliquer les effondrements de structures en langage simple, une tâche agréable et stimulante, mais uniquement parce que le coauteur d'un autre de mes livres, Matthys Levy, maître en calcul des structures, a accepté avec enthousiasme de l'écrire avec moi.

Nous avons mis à profit 85 années (cumulées à nous deux) d'expérience de l'enseignement et de conception des structures, et soixante années d'investigations sur les effondrements pour amener le lecteur dans un « voyage » intéressant et, nous l'espérons, distrayant, qui lui permettra de regarder les immeubles qui l'entourent comme il ne l'avait jamais fait auparavant. Il comprendra mieux pourquoi les ouvrages tiennent debout, mais aussi pourquoi, de temps à autre, le moins souvent possible, ils s'effondrent.

M. S.

# Introduction

Il était une fois... les Sept Merveilles du monde. Une seule a bravé l'épreuve du temps : la pyramide de Kheops qui se dresse comme une montagne dans le désert du Caire.

Les six autres se sont effondrées.

Le destin de l'Homme et de toute création humaine est de disparaître, mais nous ne pouvons nous empêcher de penser que ce que nous avons construit durera éternellement. Un effondrement ne manque jamais de nous surprendre et nous inquiète toujours.

Cette surprise est en partie due à ce que la plupart d'entre nous jugent les bâtiments d'après leur façade. Ils nous paraissent magnifiques quand ils sont « vieux », et laids quand ils sont « jeunes », précisément le contraire de ce que nous éprouvons pour un visage. Mais ce type de jugement superficiel est trompeur, et le corps semble ici constituer une métaphore plus pertinente.

Un bâtiment est conçu lorsqu'il est dessiné, naît lorsqu'il est construit, vit tant qu'il tient debout, et meurt de son grand âge ou d'un accident inattendu. Les fenêtres et le système de ventilation en sont l'appareil respiratoire. Des fluides circulent dans les veines et les artères de ses tuyauteries et il envoie des messages à toutes les parties de son organisme par le système nerveux de ses câbles électriques. Il réagit aux changements qui affectent sa condition interne ou externe par un cerveau fait de capteurs et se protège derrière la peau de sa façade retenue par un squelette de poteaux, de poutres et de dalles. Enfin, il repose solidement sur les pieds de ses fondations. Comme la plupart des corps humains, les bâtiments mènent une vie bien remplie et finissent par mourir.

La mort accidentelle d'une construction est toujours due à la défaillance de son squelette, la structure. Puisque les lecteurs de ce livre veulent savoir pourquoi les bâtiments s'effondrent, ils s'attendent sans doute à une explication des causes de leur défaillance. Mais de même que les médecins considèrent la santé comme la norme et la maladie comme l'exception, et qu'ils tirent la plus grande partie de leurs connaissances des maladies elles-mêmes, les ingénieurs considèrent les constructions qui tiennent debout comme la norme et celles qui s'effondrent comme l'exception, apprenant tout autant de ces échecs. Qu'un bâtiment tienne ou qu'il tombe, différents facteurs sont à prendre en ligne de compte : les nombreuses fonctions qui lui sont attribuées, les formes infinies qu'il peut prendre, la multitude de matériaux supposés résister à des charges et des forces variées... autant de paramètres (souvent obscurs pour le néophyte)

qui influencent la manière dont travaille une structure. Fort heureusement, nul n'a besoin d'être expert, car la compréhension du comportement des structures demeure accessible à tous, par simple intuition, sans faire appel à la physique ou aux mathématiques. En effet, quels que soient le système porteur (l'ossature en acier d'un immeuble de bureaux ou la coupole d'une église), les matériaux utilisés (acier, bois, béton armé ou pierre) et les forces en jeu (gravité, vent, tremblements de terre, changements de température ou tassement différentiel du sol), à l'échelle du matériau, les éléments d'une structure ne peuvent être sollicités qu'à la traction et à la compression.

Vous êtes ainsi invité à nous accompagner dans ce voyage de découverte. Lorsque vous aurez compris comment se comportent les structures, vous apprendrez qu'elles font généralement de leur mieux pour ne pas s'effondrer, comme si elles avaient un devoir social à remplir.

Le lecteur qui voudra acquérir une compréhension plus approfondie des raisons pour lesquelles la plupart des constructions résistent pourra se référer aux annexes de ce volume dans lesquelles est expliqué le comportement élémentaire des structures en termes simples, sans renvoi à des connaissances de mathématiques ou de physique<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Le lecteur pourra également consulter du même auteur : *Comment ça tient ?*, Parenthèses, Marseille, 2005.

# La première défaillance de la structure d'un ouvrage

« Si tu veux maîtriser le futur, étudie le passé. »  
Confucius

À l'origine, selon l'Ancien Testament, « toute la terre avait une seule langue et les mêmes mots ». Des linguistes, aidés par des archéologues, des paléontologues et des généticiens, ont pu reconstituer de 150 à 200 mots de cette langue de la protohistoire, la première d'une humanité vieille de plus de 100 000 ans. Si l'idée d'un seul peuple et d'une seule langue nous paraît magnifique, nos ancêtres n'en étaient pas satisfaits pour autant. Leur ambition était telle qu'ils décidèrent de construire une cité dotée d'une tour qui monterait jusqu'au ciel. Dieu, offensé par cette orgueilleuse prétention, fragmenta leur langage unique en tellement de langues différentes que les hommes, désormais incapables de se comprendre, sombrèrent dans la confusion et leur tour s'effondra. Ces blasphémateurs furent dispersés sur toute la surface de la terre et abandonnèrent la cité : « C'est pourquoi on l'appela du nom de Babel car c'est là que l'Éternel confondit le langage de toute la terre, et c'est de là que l'Éternel les dispersa sur la face de toute la terre » (Genèse 11 : 1-9).

Ce fut le premier effondrement de structure, attribué au Tout Puissant, une excuse que l'on n'accorde plus aux ingénieurs d'aujourd'hui, bien que les anglo-saxons qualifient encore certains sinistres d'actes divins ; mais au fond, ils savent bien que l'on peut trouver une explication plus simple à l'effondrement de la Tour de Babel. La pierre la plus dure ne peut que s'écraser sous le poids d'un empilement sans fin de blocs, et même si la tour mythique n'avait pas atteint la hauteur espérée, un tremblement de terre l'aurait renversée, les sollicitations sismiques étant proportionnelles au poids du bâtiment et au carré de la hauteur.

Des Sept merveilles du monde, une seule subsiste aujourd'hui : la pyramide de Kheops en Égypte. Qu'est-il arrivé aux six autres ? Plusieurs, comme les Jardins suspendus de Babylone, furent probablement abandonnées avant de disparaître. Le Phare d'Alexandrie en Égypte, achevé par Sostratos de Cnide sous le règne de Ptolémée II vers 280 av. J.-C., et dont on pense qu'il

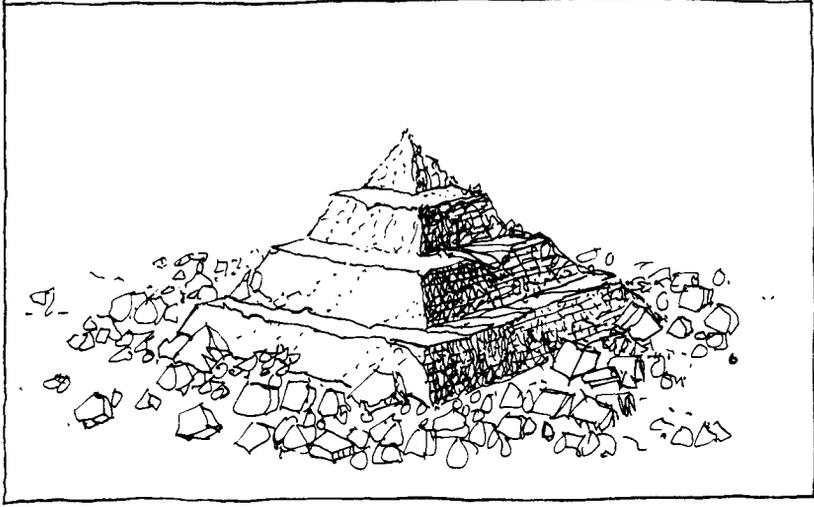


Fig. 1.1 Pyramide de Meïdoum.

atteignait la hauteur incroyable pour l'époque de 105 m, fut renversé par un tremblement de terre au XIII<sup>e</sup> siècle. Le Mausolée d'Halicarnasse (environ 352 av. J.-C.), édifié par les Grecs en Asie Mineure en souvenir du roi Mausole de Carie, fut également victime d'un séisme au XIV<sup>e</sup> siècle et servit de carrière aux chevaliers de Saint-Jean pour édifier un de leurs châteaux. Certaines de ses sculptures furent découvertes en 1856 par Sir Charles Newton qui les expédia d'Halicarnasse au British Museum à Londres. Le temple d'Artémis à Éphèse, également en Asie Mineure (Turquie actuelle), brûla entièrement au IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C., puis fut reconstruit au III<sup>e</sup> siècle avant d'être détruit par les Goths lors du sac de la ville en 362. Le Colosse de Rhodes et la statue de Zeus olympien à Athènes (435 av. J.-C), œuvres de Phidias, le plus grand sculpteur de l'Antiquité, ont probablement été démolies par des envahisseurs ou abattues pour prélever les ornements en or de la face de Zeus. Seules subsistent les pyramides égyptiennes âgées de près de 5 000 ans, mais pas toutes cependant : celle de Meïdoum a vu disparaître son parement extérieur de 250 000 tonnes de calcaire et ses vestiges forment une sorte de structure à trois gradins émergeant d'un amoncellement de sable et de blocs de pierre [fig. 1.1].

Les pyramides d'Égypte ont été édifiées pour répondre à quatre défis, tous essentiels pour ce premier État centralisé de l'histoire, et chacun d'une nature très différente : le mystère de la mort (défi religieux), l'affirmation de la puissance divine des pharaons (défi politique), l'emploi de myriades de paysans pendant les inondations du Nil qui fertilisait la vallée mais les privait de travail (défi social) et le besoin d'un observatoire pour l'étude des cieux (défi scientifique).

La forme de ces montagnes dues à la main de l'homme, est la plus logique pour un monument de grande hauteur (jusqu'à 144 m) devant être édifié dans un pays ne disposant que d'un unique matériau de construction : la pierre. Celle des rives nord du Nil servit à ériger la partie centrale, et le calcaire blanc des carrières méridionales de Toura, l'habillage. Les Égyptiens ignoraient la moufle, ne savaient pas utiliser la roue pour transporter les charges lourdes et ne connaissaient pas de métal plus dur que le cuivre. Il est donc particulièrement étonnant qu'ils aient pu tailler, transporter et monter des blocs de pierre allant de 2,5 tonnes (2,3 millions de blocs pour la Grande Pyramide de Gizeh) à 20 tonnes (pour le toit de la chambre royale de ce même édifice).

Persuadés que le mort devait rester entouré de tous les agréments de la vie pour connaître le bonheur dans l'au-delà, les prêtres égyptiens emplissaient les chambres des pyramides adjacentes à celle du sarcophage royal de ses plus précieuses possessions et les condamnaient par d'ingénieuses portes en pierre pour éviter les vols. Mais à l'époque, et encore aujourd'hui, les voleurs étaient souvent plus futés que la police et ces trésors furent pillés tout au long des trente dynasties égyptiennes.

Conscients que les pierres du sommet de la pyramide ne devaient supporter que leur propre poids alors que les blocs de la base soutenaient le poids de tous ceux qui les surmontaient (6,5 millions de tonnes pour la Grande Pyramide de Gizeh), ils adoptèrent pour les faces inclinées de toutes les pyramides, sauf deux, un angle de  $52^\circ$ , ce qui donne un rapport de la hauteur de la pyramide à sa base de  $2/\pi$ , soit environ les  $2/3$  du côté de la base carrée<sup>1</sup>. Ainsi, l'accroissement du poids de haut en bas entraînait celui du nombre de blocs de la base et la pyramide prenait une forme semblable à celle de la plupart des montagnes. Cette forme naturelle est générée par la gravité, puisque les forces principales qui agissent habituellement sur les pyramides et sur les montagnes proviennent de leur propre poids.

Nous pouvons alors nous poser la question suivante : la pyramide de Meïdoum était-elle si mal construite qu'elle a été incapable de supporter son propre poids ? Des historiens ont expliqué son effondrement par le vol des blocs extérieurs pour construire d'autres monuments ou temples. L'inconvénient de cette hypothèse est que l'on ne trouve pas de constructions de ce type dans les environs et la plupart de ses blocs de deux tonnes sont encore présents autour de la base. On pense aujourd'hui que les blocs de parement se sont détachés à la suite d'un tremblement de terre. Mais on peut alors se demander pourquoi les autres pyramides n'ont pas connu le même sort. C'est ici que l'ingénierie

<sup>1</sup> On pense que les Égyptiens mesuraient les distances en comptant le nombre de tours d'une roue. L'utilisation du rapport  $2/\pi$  ne prouve donc pas qu'ils connaissaient la valeur exacte de  $\pi$  (rapport entre la circonférence et le diamètre d'un cercle) puisque celle-ci disparaît dans le rapport des deux longueurs, toutes deux mesurées en termes de  $\pi$ . En fait, ils affectaient à  $\pi$  la valeur biblique de 3. Il est plus que probable que le rapport ait été  $\sqrt{\phi}/2$  dans lequel  $\phi = 1,618$  est le nombre d'or, défini comme le rapport entre le grand et le petit segment d'une ligne, égal au rapport de la longueur totale de la ligne au grand segment. Les Grecs, les Romains et les Égyptiens attribuaient à la section d'or des propriétés esthétiques magiques.

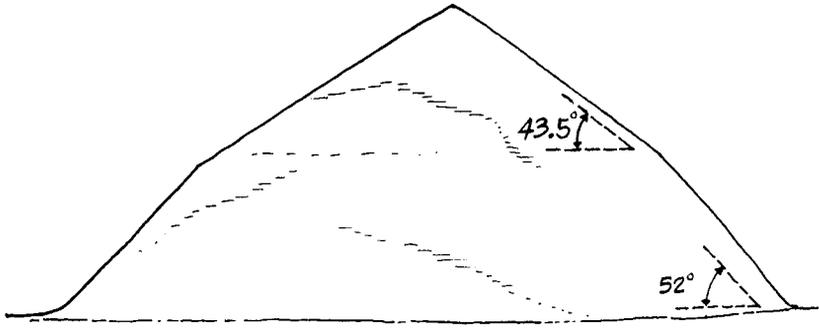


Fig. 1.2 Pyramide rhomboïdale de Dahchour.

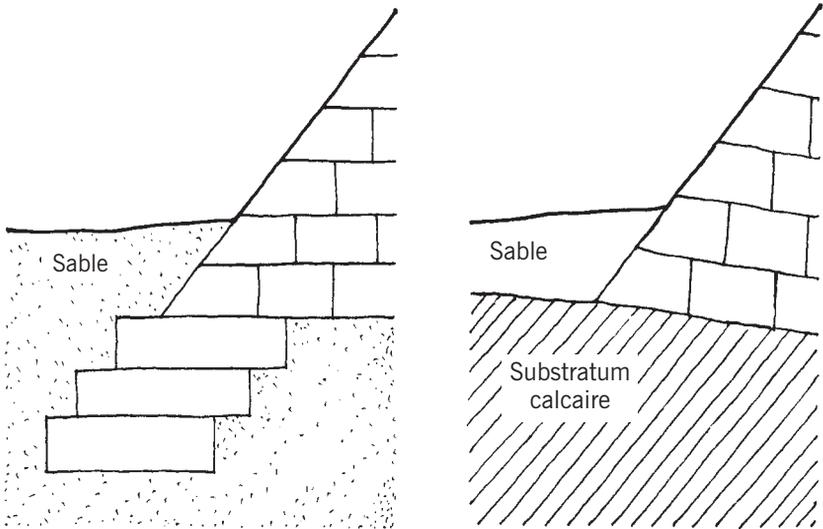


Fig. 1.3a Fondations de la pyramide de Meïdoum.

Fig. 1.3b Fondations classiques des pyramides.

intervient pour expliquer cette exception, ainsi que l'histoire des deux autres pyramides de Meïdoum.

Tirant les leçons de cette expérience, les concepteurs de la pyramide suivante, la pyramide rhomboïdale de Dahchour [fig. 1.2], après avoir donné à ses faces une inclinaison de  $52^\circ$  dans sa partie inférieure, ont continué, à partir du deuxième tiers de la hauteur environ, avec une pente plus faible et plus sûre de  $43,5^\circ$ . Le rapport entre la hauteur et le côté a donc été réduit à  $1,5/\pi$  seulement, donc environ à la moitié du côté au lieu des  $2/3$ . Les faces de la pyramide suivante, la Pyramide rouge de Dahchour, furent érigées dès le départ avec une

inclinaison de  $43,5^\circ$ , mais par la suite toutes les autres pyramides encore debout aujourd'hui revinrent à l'inclinaison classique de  $52^\circ$ .

Une inspection approfondie de la Pyramide de Meïdoum a révélé deux éléments significatifs qui expliquent à la fois son effondrement et le retour à un angle plus audacieux par ses successeurs. Le parement de la base de la pyramide est encore intact et on peut observer que la construction de ses faces a commencé avec une pente de  $52^\circ$  mais que les fondations reposent directement sur le sable du désert et non, comme d'habitude, sur le rocher. En outre, les blocs du parement sont posés à assises horizontales et non inclinées vers l'intérieur comme dans le cas de toutes les autres pyramides [fig. 1.3]. Ainsi, deux décisions de conception relativement mineures ont été responsables de la catastrophe, puisqu'un sol sableux amplifie les actions sismiques et que la pose horizontale de blocs a facilité le glissement de ceux-ci vers l'extérieur.

Cette leçon ne fut pas perdue pour Imhotep, le plus grand mathématicien et ingénieur de l'histoire égyptienne, dont la conception de la Grande Pyramide de Gizeh sous la quatrième dynastie fut reprise dans ses moindres détails pour toutes les pyramides ultérieures. Imhotep fut divinisé et vénéré par les Égyptiens pendant trois mille ans. Ce ne fut pas le cas du pauvre Filippo Brunelleschi (1377-1446), catholique fervent, qui ne fut même pas béatifié alors qu'il avait construit sans échafaudage le magnifique dôme de Florence, Santa Maria del Fiore, entreprise qui aurait presque pu être qualifiée de miracle <sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Malheureusement, il faut deux miracles pour être déclaré Bienheureux et quatre pour être Saint.

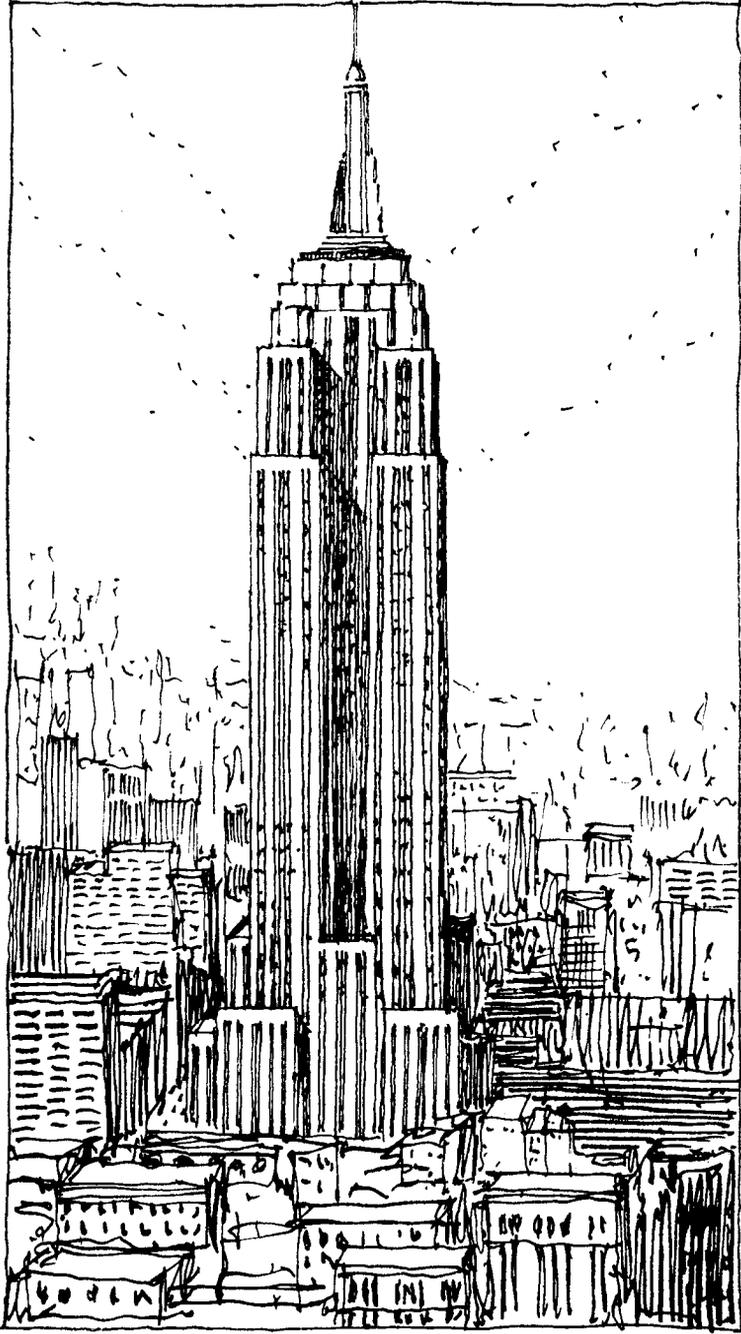


Fig. 2.1 L'Empire State Building.

# Miracle sur la 34<sup>e</sup> Rue

« Un coup de dé jamais n'abolira la hasard. »  
Stéphane Mallarmé

King Kong, le gorille hyperthyroïdien du film culte hollywoodien de 1933, escalade la façade en pierre de l'Empire State Building à New York pour échapper à ses ravisseurs. Arrivé au sommet de ce perchoir céleste, il s'agrippe d'une main à la flèche et frappe de l'autre les avions qui l'attaquent. Pour le plus gros gorille du monde, seul le cadre de la plus haute tour du monde pouvait convenir à ce combat mortel. Dominant alors le panorama des autres gratte-ciel new-yorkais, l'Empire State Building [fig. 2.1], dont le sommet est souvent voilé par les nuages, s'élève majestueusement à 381 m.

Le 28 juillet 1945, près de trois mois après la défaite nazie et la fin de la guerre en Europe, le jour où le sénat américain ratifiait la charte des Nations unies, le lieutenant-colonel W. F. Smith Jr. et son équipage s'envolèrent à 8 h 55 de Bedford dans le Massachusetts pour rejoindre Newark dans le New Jersey, aux commandes d'un bombardier B-25. Par ce matin gris, l'avion qui volait à 400 km/h arriva dans l'espace aérien de New York une heure plus tard. Smith fut avisé par la tour de contrôle de l'aéroport de La Guardia que le plafond (la distance du sol aux nuages) était de moins de 300 m, ce qui signifiait que les nuages et la brume dissimulaient le sommet des gratte-ciel new-yorkais, et en particulier celui du plus haut d'entre eux à l'époque, l'Empire State Building.

Le pilote qui volait à vue devait maintenir une visibilité vers l'avant de 5 km. Comme ce n'était pas possible entre les aéroports de La Guardia et de Newark, on lui demanda d'atterrir à La Guardia. Smith ignore cette instruction. Il poursuivit vers Newark et on l'aperçut se dirigeant vers le sud-ouest, se frayant un chemin dans le labyrinthe des gratte-ciel de Manhattan et traversant des bandes de nuages de faible altitude. Se dirigeant vers la 42<sup>e</sup> Rue, l'avion sortit tout d'un coup d'un nuage à environ 120 m du sol et se mit à reprendre de l'altitude en virant à droite. Afin de ralentir l'appareil, le train d'atterrissage fut sorti quelques instants avant que l'avion ne vienne percuter la façade nord de l'Empire State Building à 278 m de hauteur, creusant un trou de 5,5 m de large et 6 m de haut dans le mur extérieur [fig. 2.2]. La force de l'impact arracha les ailes et projeta vers l'avant l'un des deux moteurs qui traversa l'immeuble, avant de

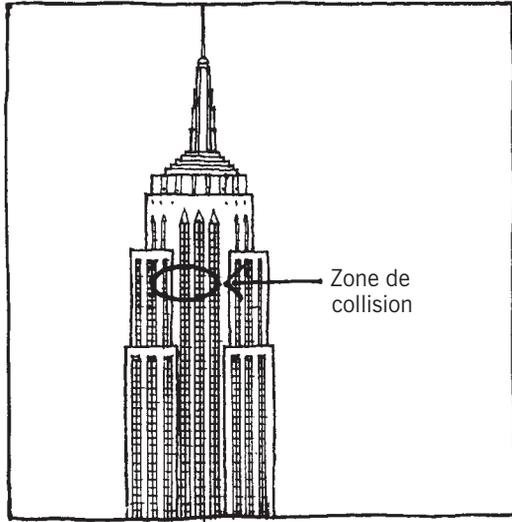


Fig. 2.2 78<sup>e</sup> étage : zone de la collision.

retomber de l'autre côté sur la toiture d'un bâtiment de onze étages de la 33<sup>e</sup> Rue, provoquant un incendie qui allait ravager l'atelier d'Henry Hering, célèbre sculpteur de l'époque [fig. 2.3]. Le second moteur et une partie du train d'atterrissage furent précipités dans la cage des ascenseurs et tombèrent jusqu'au sous-sol sur le toit d'une cabine non occupée. Deux femmes se trouvant dans un autre ascenseur tombèrent de 75 étages lorsque leur câble fut sectionné par des débris de l'avion. Elles survécurent miraculeusement, bien que sérieusement blessées, car des systèmes automatiques réussirent à freiner suffisamment leur chute. Les flammes de l'incendie provoqué par le carburant de l'avion furent à l'origine de la plupart des treize victimes dont l'équipage de l'avion.

« Je ne pouvais pas en croire mes yeux, déclara un témoin qui se trouvait sur la plate-forme d'observation au 102<sup>e</sup> étage, lorsque je vis l'avion sortir des nuages. Il percuta l'immeuble avec une telle force qu'il fit trembler toute la structure. » Le choc dispersa du carburant qui s'enflamma immédiatement et illumina brièvement le haut de l'immeuble avant que celui-ci ne disparaisse de nouveau dans le brouillard et les fumées. Les débris enflammés pleuvaient littéralement le long de la façade. Furieux, le maire de la ville, Fiorello La Guardia, arrivant comme d'habitude juste derrière les pompiers sur la scène du sinistre qui se déroulait au 78<sup>e</sup> étage, fut aperçu agitant le poing en criant : « Je leur avais bien dit de ne pas survoler la ville. »

L'impact se produisit presque dans l'axe d'un des poteaux de la façade de la tour. Le moteur droit passa d'un côté et le gauche de l'autre [fig. 2.4]. Le poteau lui-même fut à peine endommagé, bien qu'une poutre d'acier soutenant le mur en maçonnerie ait été touchée et tordue par le moteur droit, et une seconde poutre soutenant la dalle de plancher pliée, la flèche atteignant 45 cm.

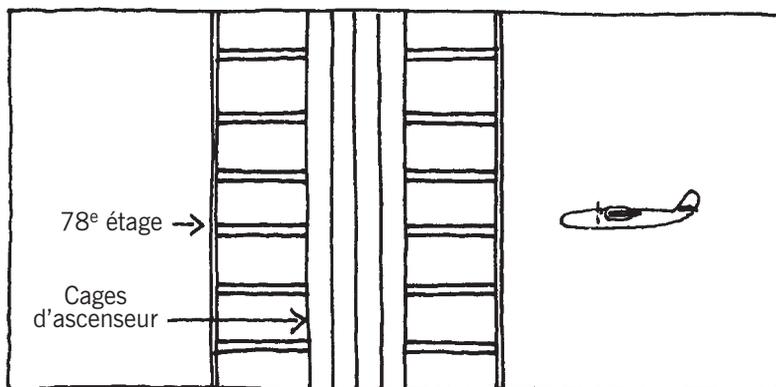


Fig. 2.3a Juste avant l'impact.

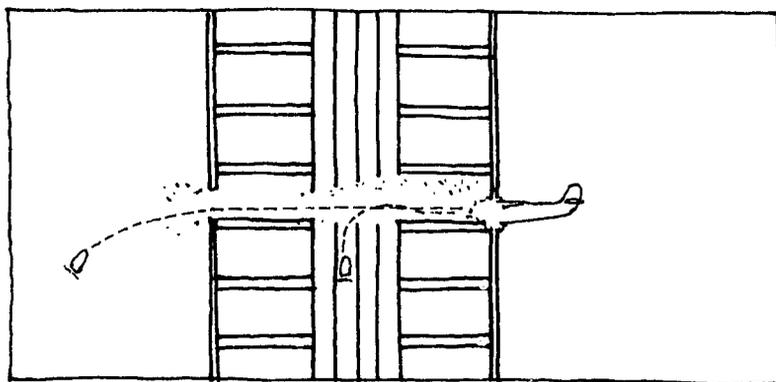


Fig. 2.3b Impact et parcours des moteurs.

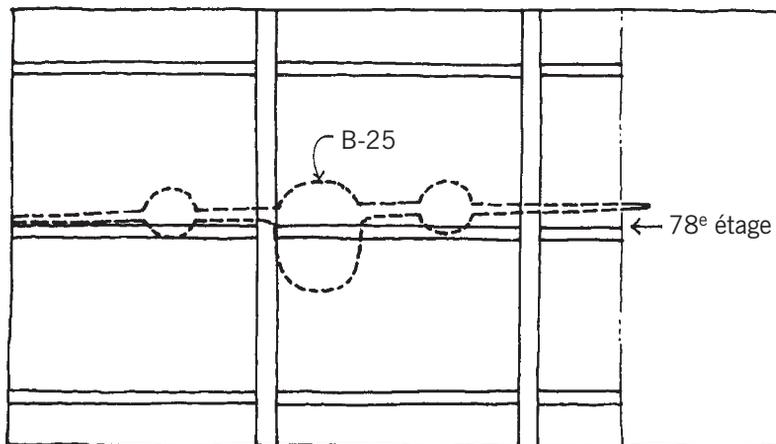


Fig. 2.4 L'alignement du B-25 par rapport au poteau.

Apparemment, l'avion avait heurté le nez de dalle du plancher du 78<sup>e</sup> étage, ce qui explique le peu de dommages au poteau. Si le point d'impact avait été un peu plus haut ou un peu plus bas, le poteau aurait été touché et les dégâts auraient pu être beaucoup plus graves...

Ce qui s'est produit en 1945 était la conséquence de la *redondance* inhérente à toute construction en portiques [voir début du chapitre 4 et chapitre 5]. Dans ce type de structure, les poutres et les poteaux sont assemblés de manière rigide, soudés ou boulonnés ensemble. Les assemblages de l'Empire State Building étaient réalisés par rivetage, pratique courante en 1932. Avec ses poteaux répartis sur une trame de 5,8 m à partir du centre, on peut comparer l'immeuble à un mille-pattes qui compenserait la perte d'une de ses pattes en redistribuant son poids sur celles qui restent. C'est donc la redondance, caractéristique essentielle de la plupart des structures, qui permet de résister à des dommages accidentels ou des défauts localisés (tous les exemples d'effondrement décrits dans ce livre peuvent être attribués au manque de redondance).

En termes quantitatifs, l'impact de cet avion de dix tonnes sur un immeuble de 80 000 tonnes extrêmement rigide est presque négligeable. L'Empire State Building avait été conçu pour résister à une force d'impulsion de vent deux cents fois plus élevée que celle générée par le B-25. L'avion du lieutenant-colonel Smith provoqua un choc sérieux, mais les vibrations ressenties par les témoins furent minimes, correspondant au faible poids de l'avion par rapport à la masse de l'immeuble. Ces mêmes témoins ont décrit cet impact comme « un mouvement double (en arrière et en avant) », suivi d'une « stabilisation ». À la différence d'une corde de guitare qui vibre dans les deux sens pendant un certain temps, les oscillations de la tour se sont rapidement arrêtées grâce à l'amortissement. Les tours anciennes habillées de maçonnerie présentent un fort amortissement du fait du frottement entre les éléments de leur structure et l'habillage, tandis que les gratte-ciel modernes, plus légers, subissent parfois de lentes oscillations de grande amplitude, qui peuvent provoquer une sorte de mal de mer chez leurs occupants. Certains immeubles de grande hauteur faiblement amortis doivent être évacués lorsque la vitesse du vent atteint certaines valeurs critiques et dans ces occasions, les clients d'un café bien connu sur le toit d'une tour à New York se voient proposer le choix d'un remboursement ou d'une boisson gratuite lorsque le lustre commence à se balancer.

Incroyable ! Un peu moins d'un an après la catastrophe de l'Empire State Building, un autre avion militaire s'écrasa sur le 57<sup>e</sup> étage d'un gratte-ciel de 278 m de hauteur à Manhattan. Ce bimoteur Beechcraft C-45 s'était perdu dans le brouillard qui recouvrait la ville le 20 mai 1946, lorsqu'il s'écrasa contre l'immeuble du 40 Wall Street à 8 h 10 du matin. Seuls ses cinq occupants furent tués car l'immeuble était pratiquement vide ce jour-là. De même que pour l'Empire State Building, le petit avion de 4 tonnes, poids relativement léger par rapport à la masse de l'immeuble, ne provoqua aucun dommage sérieux à la structure bien que l'on ait pu constater le lendemain un énorme trou dans la façade.

La proximité de ces deux accidents et l'impact dramatique de ces deux avions de l'armée de l'air se précipitant sur deux gratte-ciel new-yorkais soulèvent la question de la probabilité de catastrophe de ce type dans le futur. Il arrive aujourd'hui qu'un avion s'écrase sur un immeuble proche d'un aéroport pendant son atterrissage ou son décollage, mais aucun n'a accidentellement heurté un gratte-ciel depuis. L'accident le plus similaire s'est produit lorsqu'un hélicoptère s'écrasa au moment de se poser sur la plate-forme du 49<sup>e</sup> étage du Pan Am Building, le 16 mai 1977 à New York. L'appareil piqua du nez, une des pales de son rotor se brisa et partit comme un boomerang tuant quatre personnes sur le toit et un passant dans la rue lorsque la pale tomba du toit et descendit en vrille jusqu'au sol. « C'était comme une pluie de métal et de verre » rapporta un témoin. Après enquête, la plate-forme fut fermée car sa position en plein cœur de Manhattan était jugée dangereuse. Avec l'instrumentation de plus en plus sophistiquée des avions modernes, l'éventualité d'un événement de ce genre est de plus en plus faible, ce qui est un don du ciel si l'on considère l'augmentation du trafic aérien autour des villes.

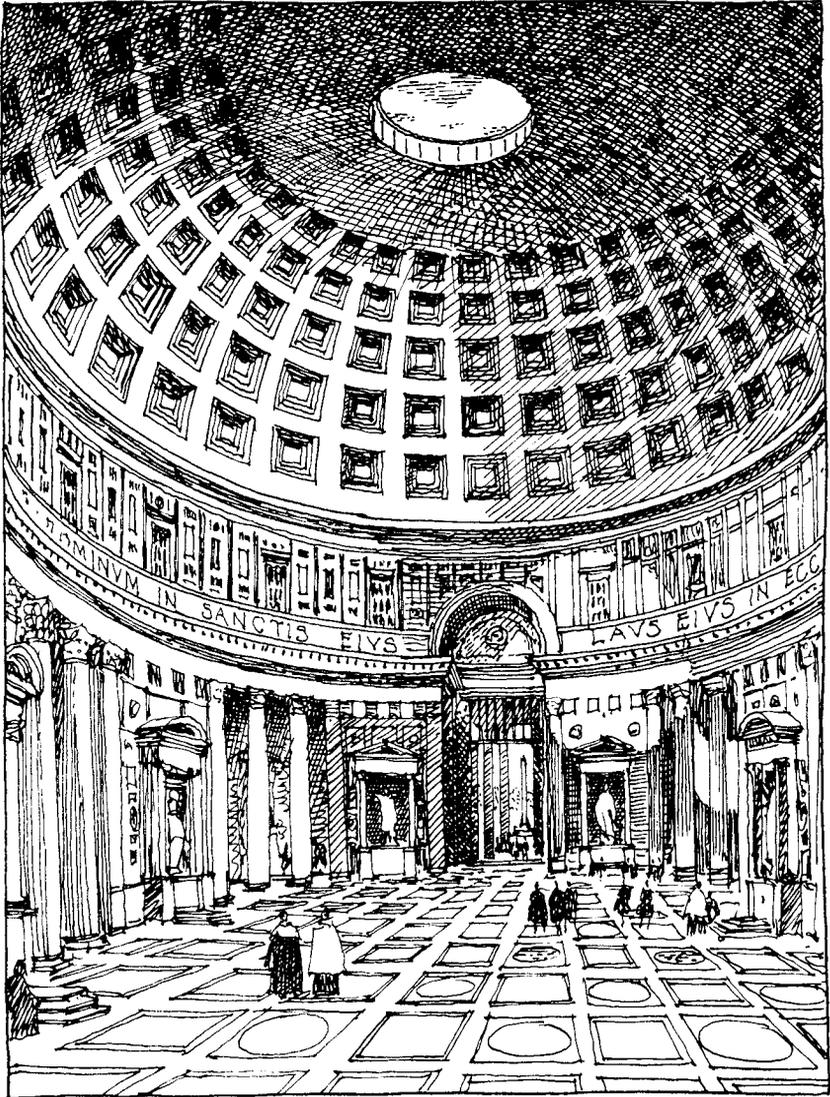


Fig. 3.1 Le Panthéon : vue intérieure.

## L'effondrement de la toiture du palais des sports de Hartford

Le soir du 17 janvier 1978, Horace Becker se trouvait dans une chambre du Sheraton Hotel de Hartford, dans le Connecticut, face au palais des sports, le Civic Center Arena. Avant d'aller se coucher, il regarda par la fenêtre et vit que la neige tombait abondamment pour la seconde fois de la semaine. Au milieu de la nuit, à exactement 4 h 15, il fut réveillé par ce qui le fit penser à « un très fort craquement » qui dura quelques instants. Complètement réveillé, il regarda à nouveau par sa fenêtre et vit, de l'autre côté de la rue, l'angle nord-ouest de la toiture du palais des sports se soulever et la partie centrale s'effondrer dans un énorme bruit de frottement. Quelques secondes plus tard, les fenêtres de sa chambre se mirent à trembler et pensant qu'un avion s'était écrasé sur le bâtiment, Becker se jeta au sol. Lorsque le bruit cessa, il regarda à nouveau et vit que les trois autres angles de la toiture pointaient également vers le ciel. Le toit de 9 700 m<sup>2</sup> s'était effondré en son centre, projetant un nuage de débris en l'air, et des morceaux d'isolation thermique de la toiture sur le parking, juste en dessous de la chambre de Becker [fig. 4.10].

Cette même nuit, des toitures s'effondrèrent dans deux autres villes du Connecticut. Trois jours plus tard, après une troisième importante chute de neige, le toit de l'auditorium du C. W. Post College à Long Island s'effondrait également [voir p.30]. En fait tout au long de l'hiver, des centaines de toitures rompirent sous le poids de chutes de neige inhabituelles, mais aucun de ces accidents ne fut aussi spectaculaire que celui de Hartford. Si ce toit s'était écrasé quelques heures plus tôt, un grand nombre des cinq mille fans venus assister à



Fig. 4.10 La toiture du palais de sports de Hartford après son effondrement.

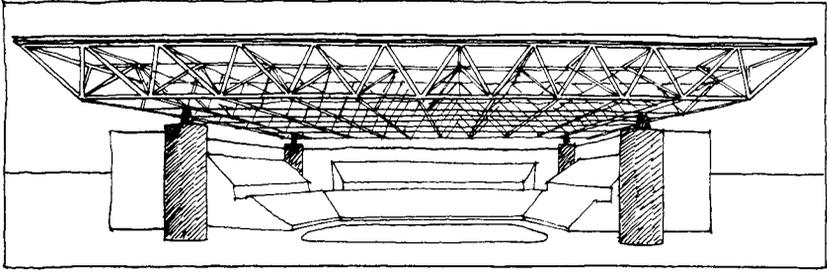


Fig. 4.11 Schéma du treillis tridimensionnel de l'Hartford Center.

un match de basket-ball aurait été tué ou blessé. Heureusement, les 1 400 tonnes d'acier tordu, de plaques de plâtre et d'isolation tombèrent sur 10 000 sièges vides.

La toiture de  $91 \times 110$  m [fig. 4.11] était une structure en treillis tridimensionnel de 6,4 m de hauteur. Elle consistait en deux nappes à maille carrée superposées, composées de barres horizontales assemblées dans des nœuds distants de 9 m. Les nœuds des deux nappes étaient décalés horizontalement et reliés par des barres diagonales. Le treillis avait ainsi l'aspect d'une succession de pyramides reliées entre elles. Les barres horizontales supérieures de 9 m de long étaient entretoisées par des diagonales intermédiaires, et les diagonales principales à mi-hauteur par une nappe de barres horizontales.

Les barres de la nappe supérieure de la plupart des treillis tridimensionnels remplissent une double fonction : elles soutiennent les panneaux de couverture et agissent comme élément résistant du treillis. À Hartford, cependant, les panneaux de couverture reposaient sur des potelets verticaux fixés sur les nœuds de la nappe supérieure [fig. 4.12]. Les concepteurs revendiquaient deux avantages pour cette formule : 1) en faisant varier la hauteur des potelets, la toiture pourrait être inclinée afin d'assurer l'évacuation des eaux pluviales, indépendamment du niveau et des déformations des barres supérieures de la structure ; 2) ces mêmes barres ne seraient pas soumises aux contraintes de flexion dues aux charges du toit.

De plus, trois concepts inhabituels avaient été appliqués à ce projet : 1) les barres supérieures du treillis avaient une section en forme de croix obtenue par assemblage de quatre cornières d'acier [fig. 4.13]. Malheureusement, la croix n'est pas une section particulièrement efficace en compression car elle se déforme sous des sollicitations relativement faibles et donc flambe plus aisément que si la même quantité de matériaux était utilisée sous forme de tube ou de barre en I. 2) Un nœud de treillis est généralement le point d'intersection théorique de toutes les barres concourant au nœud, mais à Hartford, les axes des barres horizontales se coupaient en un point et ceux des diagonales en un autre, légèrement en dessous du premier. Ainsi, les forces transmises entre les barres horizontales et les diagonales provoquaient des contraintes de flexion dans ces barres [fig. 4.13]. 3) L'ensemble du toit était supporté par quatre énormes

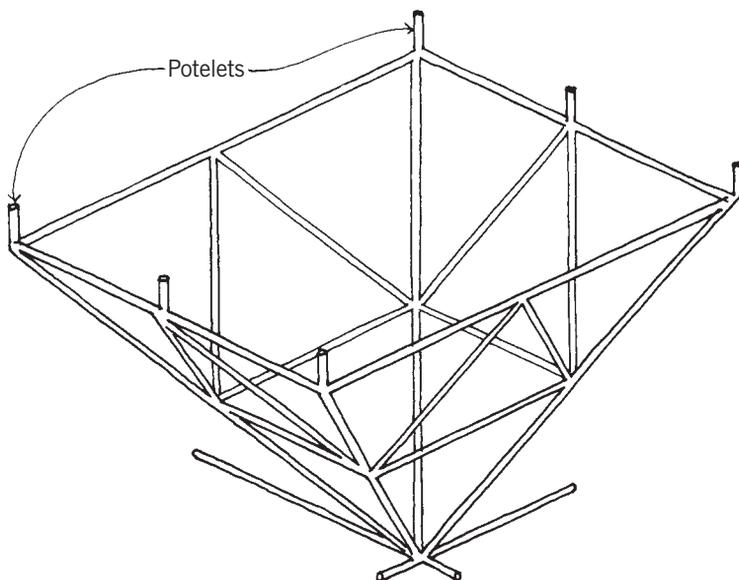


Fig. 4.12 Module pyramidal type comportant les potelets qui supportent les panneaux de couverture.

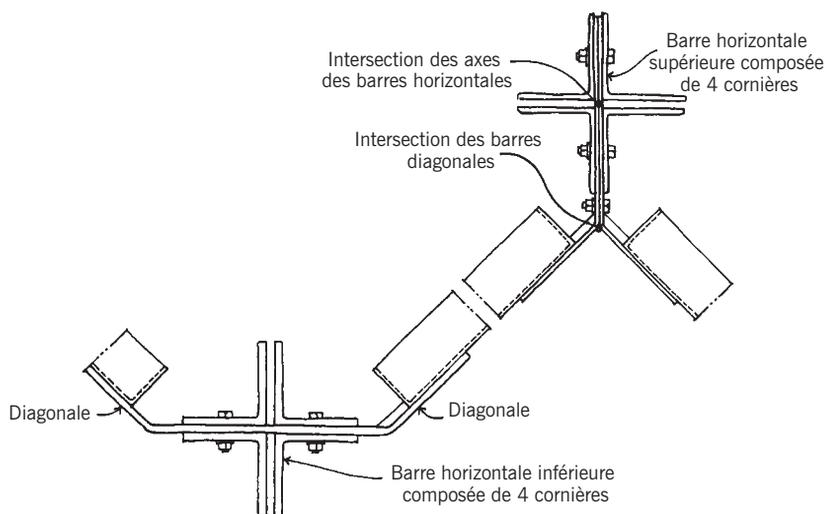


Fig. 4.13 Fixation excentrée des diagonales aux membrures cruciformes.

piliers situés en retrait de 13,70 m des quatre bords du treillis, plutôt que par des poteaux ou murs placés au droit des rives [fig. 4.11].

Malgré ces aspects inhabituels, la structure semblait solide. Pendant cinq ans, elle a résisté au mauvais temps de la région avant de brusquement s'effondrer au cours de cette nuit d'hiver, bien qu'elle eût donné de nombreux signes de danger potentiel, qui avaient été curieusement ignorés par les ingénieurs, les constructeurs, les contrôleurs et les architectes.

Vincent Kling, architecte très connu de Philadelphie, avait été engagé en 1970 sur le projet du Civic Center et avait fait appel à l'agence de Hartford de la société Fraoli, Blum & Yesselman Engineers, pour concevoir la structure du palais des sports. Au début, les ingénieurs avaient proposé une structure de toiture nouvelle, dont ils pensaient qu'elle ferait économiser un million de dollars, mais qui exigeait une étude informatique complexe pour vérifier son niveau de sécurité. La ville paya volontiers ce supplément qui lui permettait des économies et l'étude a prouvé, à la satisfaction de tous, que la structure était sûre. Un an plus tard, les plans étaient achevés, le projet fut soumis à appel d'offres et la construction de la toiture fut confiée à la Bethlehem Steel Company, de Bethlehem en Pennsylvanie. Un organisme de contrôle, Gulick-Henderson, fut retenu pour vérifier l'exécution correcte du projet.

Un des aspects originaux de la construction concernait la méthode de montage. Au lieu de monter la structure en place à près de 30 m de haut, procédé coûteux, lent et dangereux, elle fut entièrement assemblée au sol : boulonnage, pose de conduits de chauffage et de ventilation, de tuyaux d'évacuation, d'installations électriques, ainsi que de coursives de service. Seule une grève malencontreuse des peintres empêcha de passer la dernière couche de peinture grise avant l'érection. L'assemblage de la structure, qui avait commencé en février 1972, fut achevé en juillet de cette même année. C'est au cours de ce bref délai de montage que les ingénieurs reçurent notification de l'organisme de contrôle d'une déformation inquiétante et excessive de certains nœuds, mais le toit était prêt à être levé et commença lentement son ascension.

Le levage fut achevé en deux semaines au moyen de vérins hydrauliques fixés au sommet des quatre pylônes. C'était impressionnant de voir ce toit de la taille d'un terrain de football se détacher lentement du sol, jour après jour, selon des étapes déterminées. Un habitant curieux, témoin de l'opération, posa des questions sur la capacité d'une structure aussi gigantesque à résister à la force du vent et de la neige mais fut rassuré par les ingénieurs. Il n'avait aucun souci à se faire.

En janvier 1973, alors que le toit avait atteint sa position finale mais ne supportait pas encore la charge des panneaux de couverture, une mesure de contrôle indiqua que la déformation au centre était le double de la déformation prévue. Ayant été avertis, les ingénieurs ne parurent pas inquiets, expliquant que ce type de différence n'avait rien de surprenant si l'on considérait que les hypothèses des calculs théoriques étaient toujours simplificatrices. L'entreprise, qui était en train de poser les panneaux de couverture du treillis tridimensionnel au droit des quatre façades, fit savoir que les déformations en

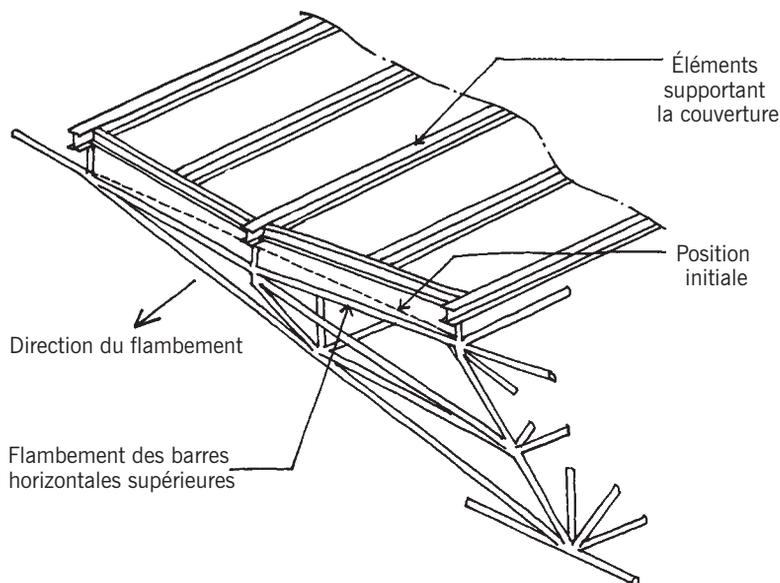


Fig. 4.14 Flambement d'une membrure horizontale supérieure.

périphérie étaient si importantes que lorsqu'ils essayaient de faire coïncider les trous pré-perçés dans le treillis et dans les panneaux de façade, ils rencontraient tellement de difficultés pour les aligner qu'ils étaient forcés de souder plutôt que de boulonner.

Au milieu de 1974, après l'achèvement de la toiture, un autre habitant possédant des connaissances techniques exprima son souci au sujet d'une grande déformation qu'il avait remarquée sur le toit, ce qui posait selon lui un problème de sécurité. Une fois encore l'ingénieur, cette fois rejoint par l'entreprise, assura à la mairie qu'il n'y avait aucune raison d'être inquiet. Enfin, en janvier 1975, quelques jours avant l'inauguration officielle, une conseillère municipale fit publiquement savoir qu'un ouvrier du chantier lui avait confié que la déformation du toit était presque le double de la valeur prévue. Suite aux assurances précédentes plusieurs fois répétées, l'inquiétude d'une personnalité « politique » ne fut même pas transmise aux ingénieurs, mais des mesures indépendantes réalisées trois mois plus tard par la ville confirmèrent la déformation anormale. Mais à ce stade, les constatations de ce genre ne furent probablement plus traitées que comme des rumeurs reposant sur des allégations anciennes.

Cinq ans plus tard, le toit s'effondrait.

Dans les jours qui suivirent l'événement, la ville chargea des experts d'évaluer les responsabilités et éventuellement la culpabilité des entreprises, des architectes et des ingénieurs, qui engagèrent à leur tour leurs propres experts pour protéger leurs intérêts respectifs. Cette armée d'experts travailla comme des fourmis sur les débris pendant des semaines, cherchant des indices

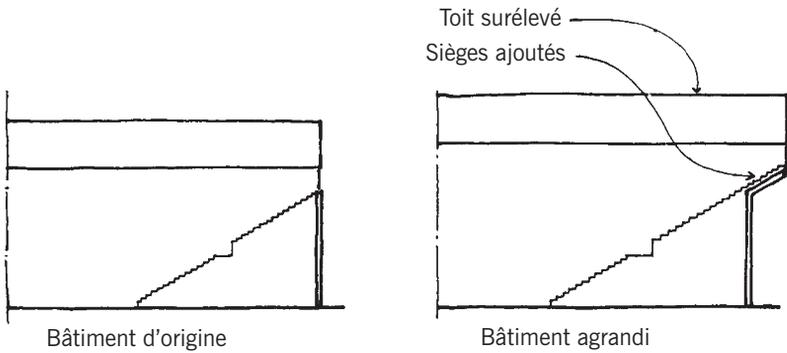


Fig. 4.15 Coupe du bâtiment d'origine et de sa version agrandie.

sur les causes de la catastrophe, tandis que la ville annonçait : « Nous allons construire une nouvelle salle... elle sera plus grande, plus belle et dotée d'un type de toiture différent. »

Le premier point exploré par les experts concernait le poids de la neige et de la glace accumulées sur le toit cette nuit du 17 janvier. Des mesures précises montrèrent que le poids réel de la neige (charge variable) accumulée au cours des deux tempêtes précédant l'effondrement était d'environ la moitié de la charge prévue par la réglementation. Le poids du toit (charge permanente) fut contrôlé et se révéla 25% plus élevé que le poids pris en compte dans les calculs. Cependant, la somme des deux charges était encore inférieure à la charge totale prévue. De toute façon, le coefficient de sécurité prévu par la norme aurait dû facilement permettre à la structure de résister à une surcharge accidentelle de ce genre.

L'attention se porta ensuite sur la configuration réelle de la structure comparée au modèle numérique élaboré par les concepteurs. Le modèle était basé sur l'hypothèse que toutes les barres de la nappe supérieure étaient entretoisées par les diagonales secondaires inclinées, ce qui était le cas à l'intérieur du treillis où ces diagonales formaient des pyramides [fig. 4.12]. Mais le long des rives du treillis, les diagonales et les barres supérieures se trouvaient dans le même plan incliné. Le flambement de ce plan n'était donc pas pris en compte. Les barres supérieures pouvaient se courber vers l'extérieur (flamber) dans une direction perpendiculaire à ce plan [fig. 4.14]. Pour prévenir ce flambement, les barres horizontales périphériques auraient dû être quatre fois plus rigides que les barres situées à l'intérieur du treillis, parce que leur longueur libre (non entretoisée) était deux fois plus grande. Et comme toutes les barres de la nappe supérieure avaient la même section, celles qui se trouvaient en périphérie étaient vouées à flamber.

Mais la question demeurait : pourquoi ce toit a-t-il quand même tenu cinq ans ?

Pour répondre à cette question, une étude fut réalisée sur l'effondrement progressif de la toiture. Un modèle informatique de la structure, intégrant les longueurs de flambement et les rigidités correctes de toutes les barres, fut activé pas à pas, pour rechercher la valeur de charge à laquelle la première barre devait flamber. Les charges, évaluées avec une marge (en négligeant le bridage de type « ressort » procuré par les assemblages réels), furent 13% en dessous de la charge totale agissant sur le toit la nuit de l'effondrement. La charge du modèle fut ensuite augmentée pour explorer ce qui s'était passé après le flambage de la première barre. Lorsqu'un élément d'une structure flambe, sa charge est transférée aux barres adjacentes qui, la plupart du temps, ne peuvent pas supporter cette charge supplémentaire et flambent à leur tour. La défaillance de ces barres transfère progressivement leur charge à de nouvelles barres jusqu'à ce que la toiture ne puisse plus supporter d'autres charges et commence à s'effondrer. La charge climatique de calcul entraînant l'effondrement était seulement de 20% supérieure au poids mesuré de la neige et de la glace. Elle provoquait une déformation de la toiture vers l'intérieur du bâtiment, similaire à celle observée après l'effondrement. Comme aucune structure réelle n'est jamais aussi parfaite que son modèle numérisé, l'écroulement du palais des sports dut se produire sous une charge un peu supérieure à celle provoquant le flambement de la première barre et inférieure à celle calculée comme charge entraînant l'effondrement. Un effondrement progressif peut ainsi partir d'un défaut mineur, à moins qu'une certaine redondance, qui est un facteur de sécurité, soit conférée à la structure. Il est désolant de noter que l'ajout de moins de cinquante barres à une structure qui en comptait presque cinq mille, opération nécessaire pour entretoiser les barres périphériques de la nappe supérieure, aurait rendu la toiture sûre, le flambement des barres étant ainsi prévenu.

Une fois les ruines dégagées, l'agence Ellerbe Architects, du Minnesota, commença à travailler sur le nouveau palais. Respectant la promesse de la municipalité, il allait être plus grand et offrir 4 000 places de plus que le précédent. La structure de la toiture fut simplifiée, avec deux poutres principales en treillis ordinaires, reposant sur les mêmes quatre pylônes relevés de 3,6 m pour s'adapter aux nouvelles dimensions de la salle (fig. 4.15). À six endroits, des poutres en treillis secondaires furent assemblées à la structure primaire. Enfin, des treillis « tertiaires » ont été fixés aux éléments secondaires, ce qui donnait un gril de poutres en treillis ressemblant à la toiture d'origine. Le palais des sports revu et corrigé commença à s'élever seize mois après l'effondrement et au printemps 1980, il était prêt à recevoir ses premiers hôtes, les fans de l'équipe locale de hockey sur glace, qui était restée sans stade pendant plus de deux ans.

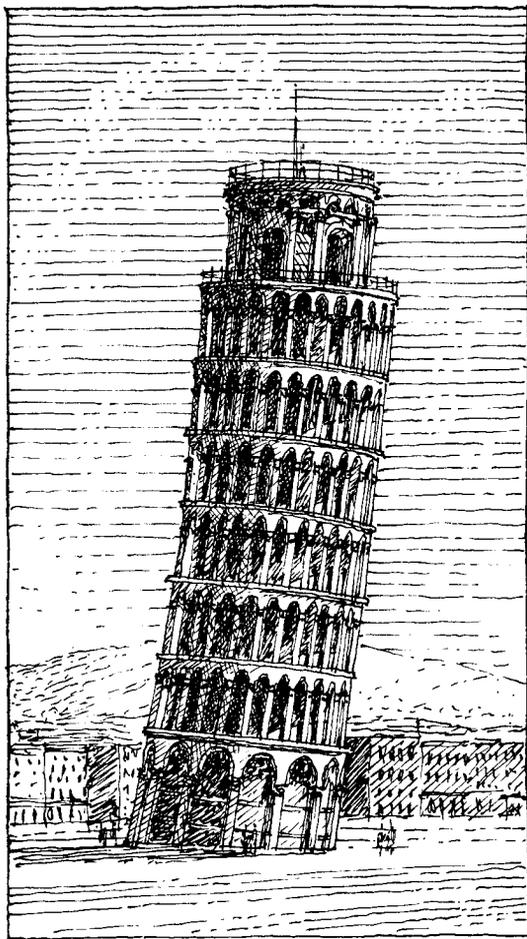


Fig. 10.3 La Tour penchée de Pise, Italie.

appelée «Piazza dei Miracoli» (place des Miracles). Elle est bordée d'une superbe cathédrale, d'un baptistère et de la fameuse tour penchée, trois monuments parés de marbre blanc dans ce style roman pisan populaire entre le XII<sup>e</sup> et le XIV<sup>e</sup> siècles [fig. 10.3].

Les scientifiques amateurs qui visitent ces monuments ne peuvent oublier que Galileo Galilei, étudiant puis enseignant à l'université de Pise, découvrit l'isochronisme des oscillations du pendule, c'est-à-dire que leur période est indépendante de leur amplitude, en mesurant avec son pouls la période du lustre suspendu du baptistère. Ils se rappellent également que la vitesse d'un corps en chute libre est indépendante de son poids, ce que Galilée prouva en laissant tomber des balles en bois et en fer du haut de la tour penchée qui, s'inclinait déjà vers le sud, son sommet s'étant déplacé de 4,5 m par rapport à sa base.

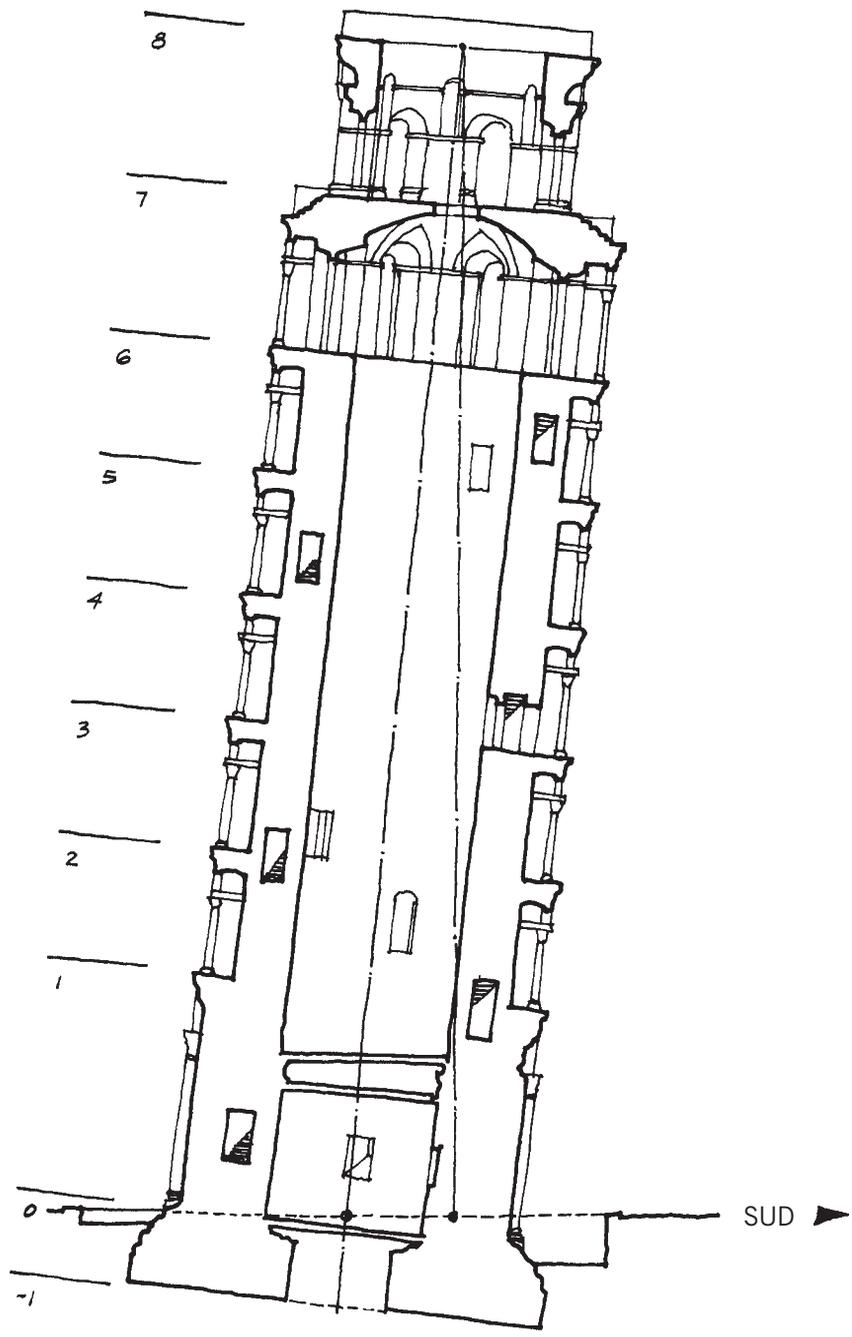


Fig. 10.4 Coupe de la Tour penchée de Pise.

# Annexes

# Charges

La plupart des effondrements de constructions sont dus à des erreurs humaines, mais ils impliquent toujours les forces physiques (charges) agissant sur ces structures. Si l'attraction terrestre n'existait pas, si le vent ne soufflait pas, si la terre ne tremblait pas, ne se tassait pas irrégulièrement et si la température ne changeait pas, nous n'aurions pas besoin de structures modernes.

L'existence de certaines charges est évidente : le poids du mobilier sur le plancher d'un appartement par exemple. Mais d'autres charges comme la pression et la succion du vent ou les charges dues aux changements de température sont moins évidentes, bien que tout aussi réelles. Explorons brièvement le monde des charges.

## Charges permanentes

Il est dommage que la célèbre histoire de la pomme tombant sur la tête d'un Isaac Newton endormi soit sans fondement historique. Elle est pourtant un bon exemple de ces forces que la terre exerce sur tout corps et que nous appelons charges gravitaires. Comme on l'apprend à l'école, le jeune Isaac considérait que deux corps sont attirés l'un vers l'autre par une force proportionnelle au produit de leurs masses divisé par le carré de la distance qui les sépare. Il s'est basé sur cette hypothèse pour vérifier la chute de la fameuse pomme et le mouvement des planètes. Et cela a marché, ce qui était plutôt brillant pour un étudiant de dix-neuf ans de l'université de Cambridge, en vacances pour cause de peste. Les structures de bâtiment se composent d'éléments lourds comme des poteaux, poutres, arcs et coupes. Leur poids propre, appelé charge permanente, constitue la plupart du temps la charge la plus élevée qu'elles doivent supporter. Le poids propre d'un élément dépend à la fois de son volume et du poids volumique de son matériau<sup>1</sup>.

L'estimation du poids propre de la structure place l'ingénieur devant un paradoxe : ce poids ne peut être calculé avant que la structure soit dimensionnée, mais celle-ci ne peut être conçue avant que son poids soit déterminé et additionné à toutes les autres charges. Seule une longue expérience permet à l'ingénieur d'estimer correctement les dimensions d'un élément de structure avant de le calculer, mais son poids propre ne sera jamais ignoré

<sup>1</sup> Par exemple, 1 m<sup>2</sup> de plancher en dalle de béton armé d'un immeuble d'habitation d'une épaisseur de 25 cm possède un volume de  $0,25 \times 1 \times 1 = 0,25 \text{ m}^3$ . Comme le béton armé pèse en moyenne 25 kN/m<sup>3</sup>, chaque mètre carré pèse 6,25 kN.

car il est toujours là. C'est une charge permanente. En fait, nous incluons dans cette charge le poids de tous les éléments toujours présents, comme les cloisons, qui peuvent être déplacées mais existeront toujours, ainsi que la tuyauterie, les conduits et autres composants de plomberie et de climatisation.

## Charges variables

L'art pour l'art peut exister, mais pas l'architecture pour l'architecture. Chaque œuvre architecturale construite a une destination. Et comme le monde physique est régi par des forces, il ne peut y avoir d'architecture sans structure.

Les charges gravitaires que la structure doit supporter en plus de son poids propre sont appelées charges variables et comprennent les charges d'exploitation (le poids du mobilier, des occupants, de leurs biens, d'équipements divers), la charge de la neige, etc. Comme elles peuvent varier d'une manière importante d'un bâtiment à un autre et qu'elles peuvent même changer d'un jour à l'autre voire d'une heure à l'autre, l'évaluation de leurs multiples combinaisons possibles, quand elle est réalisable, prendrait un temps considérable et n'aboutirait qu'à des résultats incertains. Pour éviter ces difficultés, les charges variables sont données par les codes de la construction. Ces codes listent, pour chaque type de bâtiment et pour chaque type de charge variable, les valeurs minimales à prendre en compte dans le calcul<sup>2</sup>. Ces charges sont donc conventionnelles, considérées la plupart du temps comme uniformément réparties sur un plancher ou un toit. Dans un but de sécurité, elles sont plus élevées que les poids réels attendus. Il faut cependant savoir que les codes ne dispensent pas l'ingénieur d'évaluer lui-même avec soin les charges variables lorsqu'elles risquent d'excéder celles du code.

Les effondrements de bâtiment dus aux charges d'exploitation (qui sont des charges variables) sont rares, mais cela peut arriver...

Pendant la construction d'un immeuble en béton armé à New York, l'ingénieur qui l'avait calculé reçut un coup de téléphone inattendu de son collègue chargé de la surveillance des travaux, l'informant que le plancher d'un bureau se déformait plus que prévu. Une inspection immédiate révéla qu'un entrepreneur avait temporairement entreposé dans cette pièce, les unes sur les autres, des plaques de travertin de 50 mm d'épaisseur, destinées au revêtement de la façade, qui représentaient une charge ponctuelle de 15 kN/m<sup>2</sup> au lieu des 2 kN/m<sup>2</sup> prévus. Dans ces circonstances, si le plancher s'était effondré, l'ingénieur n'aurait pas été responsable, mais si le stockage du travertin avait été prévu même temporairement dans cette pièce, il l'aurait été, malgré le respect du code qui ne prévoyait qu'une charge d'exploitation de 2 kN/m<sup>2</sup>. Néanmoins, cet événement était un bon test pour le plancher en question, et les deux ingénieurs furent satisfaits de son comportement.

<sup>2</sup> Par exemple, la charge d'exploitation du plancher d'une salle de classe à New York ne doit pas être inférieure à 2 kN/m, celle des circulations à 5 kN/m<sup>2</sup>.

# Index

- absorption : 131-133.
- accidents aériens :  
d'hélicoptère : 19.  
d'un 707 de la Pan Am : 65.  
du Comet : 97-98, 100.  
du vol 243 d'Aloha : 99-100.  
sur l'Empire State Building : 15-18, 214.  
sur le Pentagone : 219, 221.  
sur le World Trade Center (WTC) : 218-222, 221.
- acier :  
assemblage rigide : 261.  
chevrons : 156-157, 157.  
coefficient de sécurité : 47, 69, 190.  
compression : 30, 241-243, 262.  
corrosion : 113, 262.  
dômes : 26, 33, 211-212.  
ductilité : 100.  
exportation japonaise : 226.  
fatigue : 47, 100.  
fissures microscopiques : 100, 104-105.  
fixation de l'âme : 261.  
fragilité : 104-106, 226.  
hauteur des constructions : 155-156, 156.  
liaisons rigides ou encastremets : 260.  
maillons : 101.  
module d'élasticité : 212.  
oxydation : 108.  
sel : 108.  
températures élevées : 220.  
tension : 244.  
treillis tridimensionnels : 263.  
utilisation aux États-Unis : 226.
- Actium, bataille de : 137.
- adjuvants pour le béton : 152.
- adobe : 192, 225.
- affouillement : 115, 117-118, 118.
- âge des monuments : 180-182.
- Akashi-Kaykio, pont d' : 274.
- Alameda : 122.
- Alfred P. Murrah, explosion de l'immeuble (1995) : 216-217, 217.
- Aloha, vol 243 : 99-100.
- altération métallurgique : 105.
- aluminium : 226.
- Amoco, tour : 155-159, 154, 157.  
chevrons en tôle : 156-157.  
élançement des panneaux : 158.  
flambage des panneaux : 157-158.  
panneaux de marbre : 155, 157-158.  
remplacement du revêtement : 158-159.  
structure tubulaire : 156.
- Amon, temple d' : 182.
- amortisseur : 18, 165, 166, 167, 220, 236, 237.  
dynamique : 95.
- amphithéâtre de Flavien ou Colisée de Rome : 182, 194-197.
- Anasazi (Indiens) : 28.
- angle d'inclinaison : 128, 128.
- anisotropes, propriétés : 33.
- anneaux en feuillard : 36-39.
- Anthème de Tralles : 22.
- Antoine, Marc : 137.
- appui à berceau : 108, 110.
- appui mobile : 239.
- appui pendulaire : 109-114.
- arc de Titus : 195, 195.
- arcs : 22-23, 250, 253.  
a quinto acuto : 30, 31.  
compression des : 241, 253.  
coupole comme extension de l'arc : 22, 258.
- Aristote : 201.
- Arkin, Kenneth : 89-90.
- Arménie, séisme (1988) : 81.
- articulations : 46, 83-85, 260, 262.
- assemblage : 261, 262.  
anneaux : 36-39.
- assemblage rigide : 261.
- Assinelli, Ugolino Bonacosa : 172.
- Assouan, barrage d' : 135.
- axe neutre : 253-254, 254, 255.
- Babel, tour de : 9.
- Babylone, jardins suspendus de : 9.
- Bakélite : 227.
- baptistère de Florence : 25.
- barrage-voûte : 135-140.  
faiblesse latérale de la roche : 137.  
gorges de Kariba : 138.  
Malpasset : 135-140.  
Roselend : 138.
- barrages : 131-140.  
béton : 137.  
carottes : 137.  
contraintes préexistantes : 137.  
d'Assouan : 135.  
débordement : 131.  
du Gage : 137.  
effondrement le plus ancien : 132.  
en terre : 132.  
géologie : 137.  
joints : 137-138, 151.

- Kariba, gorges de : 138.  
 Malpasset : 135-139.  
 Mossoul : 131-132.  
 renards (cavités tubulaires provoquant des fuites) : 131.  
 Roselend : 138.  
 Seconde Guerre mondiale : 132.  
 South Fork : 132-134.  
 Stevenson Creek : 137.  
 sur la rivière Möhne : 132.  
 vallée de la Ruhr : 132.
- barres : 250.  
 comportement élastique des : 244.  
 déformation permanente des : 244.
- barre comprimée : 250-253, 251.  
*voir aussi* poutre/poteau.
- Bastille, la : 213.
- atardeau : 117.
- Baybars, sultan d'Égypte : 192.
- Benjamin Franklin, pont : 92.
- Ben Laden, Oussama : 218-219.
- Benoît XIV, pape : 197.
- Bethlehem Steel Company : 54.
- béton :  
 à la pouzzolane : 225-226.  
 adjuvants : 152.  
 assemblages rapides : 261.  
 barrage : 137.  
 capillarité : 152.  
 compression et béton : 78.  
 coupes : 25-29.  
 dalles : 260, 260.  
 dalles précontraintes par post-tensions : 143, 143, 148-149.  
 dans les coques de Bini : 26, 27, 38.  
 fluage du béton : 27.  
 immeuble de CBS : 228.  
 panneau (ossature) préfabriqué(e) : 80.  
 poutre : 257-258, 257, 258.  
 résistance à la traction : 78, 137, 143, 241-244.  
*voir aussi* béton armé.
- béton armé : 123.  
 comportement monolithique : 260.  
 coupes : 25-26.  
 ductilité : 75.  
 force horizontale : 62.  
 invention du : 226, 241.  
 module d'élasticité : 212.  
 noyau central : 263, 265.  
 oxydation des barres : 152.  
 poutre : 257, 258.
- béton préfabriqué : 80, 81-82.
- bicyclette, toiture en roue de : 269, 270.
- Bini, Dante : 26, 268.
- Boeing 757, attaque terroriste sur le Pentagone : 219-221.
- Boeing 767, attentat du World Trade Center : 218-219.
- Boggs, Howard : 103.
- bombardier B-25 : 15, 17, 18.
- boulons, serrage des : 153.
- bras de levier de la force : 249.
- brides/attelage : 109.
- Bridgeport, accident de, *voir* L'Ambiance Plaza.
- Brighton, pont à chaîne de : 92, 93.
- briques : 225-226.  
 façades : 151-153, 172.  
 séismes et : 77-78.
- briques cuites au four : 225-226.
- Bronx-Whitestone, pont de : 88-95.  
 amortisseur dynamique : 94-95.  
 Tacoma Narrow Bridge, comparé au : 92-95.
- Browning, Elizabeth Barrett : 171.
- Bruce, Thomas : 193.
- Brunelleschi, Filippo : 13, 21, 25.
- Bucarest, coupole de : 36, 37, 38-39.
- Buckminster Fuller, Richard : 270.
- C. F. Murphy, agence de : 43.
- C. W. Post, dôme du : 30, 32-35, 51.
- câbles : 87-88, 250, 251, 252.  
 constitution : 101-102, 250, 251, 252.  
 contreventement : 147.  
 de stabilité : 87-92.  
 fils/brins : 102, 103, 250.  
 haubans intérieurs : 89, 89.  
 incurvés : 250.  
 membrane comme extension du câble : 257-258.  
 pont suspendu : 101.  
 stabilité des : 250.  
 sur la tour de Pise : 129.
- Callicrates : 192.
- canal de Pennsylvanie : 132.
- capillarité : 152.
- Capitole de Washington : 23.
- Carnegie, Andrew : 133.
- ceintures sismiques : 72.
- Celluloid : 227.
- Centre national des Industries techniques (cnit), Paris : 29, 29.
- céramique, composants en : 226.
- César, Jules : 137.
- chaos, théorie du : 158.
- charge : 217-221, 233-240.  
 concentrée : 37.  
 dômes/coupes : 22, 27, 30, 32, 266, 267.  
 dynamique : 235-240.  
 équilibre : 247-250.  
 Euler : 252.  
 flambage : 34, 34.  
 gravité : 22, 33, 62, 248.  
 liquéfaction : 79.  
 poutres : 253-254, 254.  
 redondance : 18, 41.  
 séisme : 238-240.  
 valeur critique : 42.
- charge du vent : 34.
- charge uniforme : 32, 37, 267.
- charge verticale : 92, 145, 157, 253, 257, 263, 266.
- charges concentrées : 37.
- charges de gravité : 22, 33, 62, 248.
- charges dynamiques : 102, 104, 220, 235-236, 238, 243.
- charges dues aux dilatations thermiques : 233, 238-240.
- charges statiques : 217, 235, 243.

- charges variables : 47, 190, 234-235.  
 codes de la construction : 234-235.  
 défaillance structurelle : 234.  
 évaluation : 234-235.
- Charles II, roi d'Angleterre : 76.
- Charleston, Caroline du Sud, séisme de (1886) : 71, 76-78.
- Charpy, essai de : 105.
- Chichen Itza : 182, 192.
- Churchill, Winston (Sir) : 197.
- chute libre : 204, 204.
- cisailllements lors de séismes : 78.
- Citicorp, immeuble de la : 167.
- clé de voûte : 22, 253, 253, 267.
- Cléopâtre, reine d'Égypte : 137.
- cnit (Centre national des Industries techniques), Paris : 29, 29.
- Cobb, Henry N. : 162.
- code d'Hammourabi : 201-202.
- code Napoléon : 202.
- Codex Constitutionum : 202.
- coefficient d'absorption d'eau : 161.
- coefficient de flambement : 38-39, 211-212.
- coefficient de sécurité : 56, 69.
- Colomb, Christophe : 171.
- Colosse de Rhode : 10.
- Columbia Broadcasting system (cbs) : 159, 228.
- Comet (avion) : 98, 98-100, 104.
- comportement des matériaux : 245-246.
- compression : 78, 143, 225.  
 arcs : 241, 244, 253.  
 bois : 241, 244.  
 câbles : 250.  
 contrainte et : 157-158, 241-244.  
 de l'acier : 241, 244.  
 de la pierre : 241, 244.  
 déformation et : 241-244.  
 équivalence du cisaillement avec la compression : 258.  
 fatigue du métal : 98-99.  
 flambement/flambage : 252, 252.  
 montants : 252.  
 murs en maçonnerie : 78.  
 thermique : 238.  
 tirants : 178.
- compression des plaques tectoniques : 73.
- compression thermique : 238-239, 238.
- Confucius : 9.
- constructions préfabriquées : 81-82.
- continuité mécanique dans les joints de construction : 63.
- contraintes : 42.  
 appui pendulaire : 109.  
 compression : 239-240, 239.  
 concentration : 99, 100, 104-105, 112.  
 corrosion : 105-106.  
 de rupture : 100.  
 déformation : 52.  
 discontinuités : 100.  
 élasticité : 245-246.  
 préexistantes : 137.  
 tension : 269-270, 269.  
 torsion : 93.
- contraintes de flexion : 52, 240, 239.
- contreforts : 22-23.
- coques de Bini : 26, 26-28, 268.  
 béton ajouté et : 27, 28.  
 effondrement de : 26-28, 27, 28, 34.
- corde de fibres végétales, pont en : 250.
- cornière de levage : 144-147.
- cornières « anti-explosion » : 63-64, 64.
- cornières horizontales : 160, 161.
- coulissage : 72, 73.
- coupole autotendante : 267, 269, 271.
- Coventry, bombardement : 197.
- Coyne, André : 135, 137-139.
- cuivre : 105.
- cycle des températures :  
 fatigue du métal : 104.  
 fissures causées par le : 153.
- Cypress, viaduc : 83, 83-85.
- Dahchour, Pyramide rhomboïdale de : 12-13, 12.
- dalles :  
 béton : 216-217, 264, 269.  
 comme extension d'une poutre : 260.  
 joints avec les poteaux : 143, 144, 145.  
 post-tension : 141, 143, 149.  
 sol : 263.
- dalles (plancher) : 260, 263.
- dalles levées, technique des (*lift slab*) : 141-147.  
 déformation du cadre : 147.  
 séquence de la rupture : 148.
- Dargeou, Jacques : 138-139.
- De Vinci, Leonard : 253.
- Deauville Hotel : 181, 182, 191.
- déformation : 156, 245-246, 245.  
 des dômes : 266, 267.
- déformation permanente : 244, 246.
- déformation plastique : 100.
- déplacement du lit de la rivière : 118.
- déplacement horizontal : 156.
- désintégration du mortier : 151.
- dessin et conception assistée par ordinateur : 227.  
 confiance aveugle dans : 229.  
 séismes et : 225.
- digues (barrages) : 131.
- digues en terre : 131.
- distance en cas de chute libre ou de saut : 204, 204.
- dômes en encorbellement : 266, 267.
- dômes/coupoles : 21-40, 22, 23, 24, 256.  
 théorie des membranes : 30, 32-34.  
 arcs/voûtes : 22-23, 258.  
 autotendant(e)s : 269-270, 271, 272.  
 capitole de Washington : 23.  
 cerclage : 258, 259, 267-268.  
 de la cathédrale de Florence : 13, 267.  
 de Sainte-Sophie : 21-23, 23, 29, 182, 224.  
 déformation : 258, 259.  
 du cnit : 29, 29.  
 du Panthéon : 20, 30, 267.  
 elliptique : 270.  
 en encorbellement : 266, 267.

- filières : 250.  
 flambement/flambage : 24, 33, 34, 34, 252.  
 membranes gonflables *voir* coques de Bini : 26.  
 méridiens : 22, 22.  
 métal : 34.  
 métaphore de la coquille d'œuf : 25-26, 268.  
 module d'élasticité : 35, 212.  
 origines : 21-22.  
 parallèles : 22, 22.  
 pierre : 29, 267.  
 quinto acuto : 30.  
 rapport hauteur/portée : 30.  
 réactions : 33, 33.  
 réticulés : 30.  
 Saint-Pierre (Rome) : 21, 23, 24.  
 Santa Maria del Fiore : 13, 21, 23, 24.  
 séismes/tremblements de terre : 22, 37.  
 stade Olympique d'Atlanta : 270, 272.  
 structure tubulaire : 38-39, 38.  
 structures : 267-270.  
 Suncoast : 271.  
 surface en forme de selle : 267, 267-268.  
 Triodetic : 30.  
 vent : 34, 34.
- Dresde, bombardement : 197.  
 droit romain : 201.  
 ductilité : 75-76, 81, 100, 105-106.  
 École polytechnique de Milan : 175.  
 effet « P-delta » : 167, 168.  
 effet Bernoulli : 48.  
 effondrement (réaction en chaîne) : 49.  
 effondrements :  
   autoroute Nimitz : 83.  
   barrage de Malpasset : 135-139.  
   barrage de South Fork : 132.  
   C. W. Post College : 30, 32, 34.  
   campanile San Marco : 170, 171-175, 182.  
   collège de la Sierra : 147.  
   coques de Bini : 27-29.  
   coupole de Bucarest : 36, 37, 38-39.  
   déplacement du lit de la rivière : 118.  
   fissures de fatigue : 113.  
   Hatchie River Bridge : 118-119.  
   Hyatt Regency : 183-184.  
   immeuble Alfred P. Murrah : 216-217, 217.  
   immeuble de Ronan Point : 59-64, 67, 82, 217.  
   L'Ambiance Plaza : 141-143.  
   palais des sports de Hartford : 51.  
   palais des sports Kemper : 42-44.  
   pont à chaîne de Brighton : 92, 93.  
   pont de Point Pleasant : 101.  
   pont de Schoharie : 114-118.  
   pont des détroits de Tacoma : 87-92.  
   pont sur le Mianus : 107.  
   progressif : 41, 57, 63, 145.  
   réaction en chaîne : 41.  
   tour communale de Pavie : 172-174.  
   World Trade Center : 214-215, 215.
- effondrements progressifs : 41, 57, 63, 145.  
 église de la Trinité, Boston : 164.  
 Einstein, Albert : 198, 224.  
 élanement : 158, 161.  
 élasticité : 245-246, 245, 246.  
   métaux : 100.  
   module d'élasticité : 212, 243.  
   élasticité linéaire : 245-246.  
 Elgin, marbre d' : 193-194.  
 Ellerbe Associates : 57.  
 Empire State Building : 14, 15-19, 213, 214, 221.  
 Enola Gay : 198.  
 enrochements : 117, 135.  
 Éphèse : 10, 182.  
 équations différentielles non linéaires : 224.  
 équilibre : 247-249.  
 équilibre d'un tape-cul : 248, 249.  
 Érié, canal de l' : 114-115.  
 étais : 147-149.  
 Euler, Leonhard : 252.  
 expansion thermique : 153.  
   des ponts : 238-239, 239.  
 explosifs : 216-217.  
 explosifs : 216-217.  
   fioul : 218-219.  
 explosions :  
   New York, 45e Rue : 65-69.  
   tour de Ronan Point : 60-63, 61.
- façades :  
   adjuvant béton : 152.  
   arcs virtuels : 22.  
   capillarité : 152.  
   contrainte thermique : 239.  
   en briques : 151-155, 172.  
   et l'eau : 151-153, 155, 157.  
   immeuble Alfred P. Murrah : 216-217.  
   Lincoln First Bank : 159, 161-162.  
   New York, immeubles en pierre brune : 181.  
   panneaux préfabriqués : 151-153, 153.  
   tour Amoco : 155-162.  
   tour Hancock : 152, 162, 163, 164, 169.  
   tour Xerox : 159-162.  
   World Trade Center : 214.
- failles ou lignes de fracture : 72.  
 fatigue du métal : 47-49, 97-113.  
   acier : 47.  
   Comet : 97, 99.  
   défaillance des panneaux de la tour Hancock : 164.  
   définition : 99.  
   essai de Charpy : 105.  
   pont Point Pleasant : 101-106.  
   pont sur le Mianus : 113.  
   résistance : 99.  
   rupture fragile : 104-105.  
   température : 101.  
   tension : 99.  
   vol 243 d'Aloha : 99.
- Fermi, Enrico : 68, 198.  
 Fermi, problème de : 68.  
 fibre de carbone : 226.  
 fission nucléaire : 198-199.  
 fissures en forme de X : 78-79.  
 fixation de l'âme d'une poutre : 261.  
 flambage/flambement : 52-57, 55.  
   barres : 252, 252.  
   chevrons en tôle : 156.  
   dômes : 34-35, 38-39, 252.  
   élanement : 158.  
   instabilité : 34.  
   palais des sports de Hartford : 52-53.  
   panneaux de marbre : 155-157.

- poutre acier : 258.  
 poutre en I : 258.  
 sphère isotrope : 35.  
 valeur d'Euler : 252.
- Florence, cathédrale : 267.
- fluage :  
   béton : 27.  
   panneaux de marbre : 161.
- fondations : 263.  
   pyramides : 9-13, 12.  
   structures : 274.  
   tassements différentiels : 274.
- fonte : 78, 105.
- force :  
   constante : 237.  
   experts judiciaires : 202.  
   moment de : 249.
- force constante : 237.
- force de cisaillement : 156.  
   réactions des poutres : 256, 256, 257.  
   séismes : 78-79.
- force ultime : 244.
- formation d'une cuvette : 48, 48.
- forteresse des Chevaliers de Saint-Jean de  
 Tripoli : 10, 192.
- Fossati, Gaspar : 23.
- Fossati, Giuseppe : 23.
- Fraccaro (Pavie), tour : 177-178, 179.  
   renforcement : 179.
- Fréjus : 137-139.
- frottement : 72.
- Galilée : 125, 224.
- Geiger, David : 269, 270.
- General Electric, bâtiment du : 152.
- George Washington, pont : 88, 92-93, 272.
- Gizeh, Grande Pyramide de : 11, 13, 182.
- Goldberg, Rube : 65.
- Golden Gate Bridge : 88, 92-93.  
   mouvements/oscillations : 88-89.
- Grande Mosquée de Djenné, Mali : 226.
- gratte-ciel :  
   Empire State Building (New York) : 14-18,  
   14.  
   John Hancock (Boston) : 162-169.  
   Lincoln First Bank (Rochester) : 159-162.  
   tour Amoco (Chicago) : 155-159.
- Hadj, terminal : 268, 268.
- Hadrien, empereur : 267.
- Hahn, Otto : 198.
- Halicarnasse, mausolée d' : 10.
- Hammourabi, code : 201.
- Hancock, tour : 155-169, 163, 165.
- Hartford, palais des sports : 31, 50-51, 52,  
 54.
- Hatchie, pont : 118.
- haubans intérieurs : 87, 89.
- hélicoptère, accident sur le bâtiment de la  
 Pan Am : 19.
- Hiroshima, bombe atomique : 75, 198, 236.
- Hitler, Adolph : 197.
- Horiyu-ji, temple (Japon) : 182.
- hôtel Imperial, Tokyo : 78.
- hôtel Vista, New York : 214.
- Hyatt Regency, Kansas City : 183-190.  
   composants : 183-187.  
   effondrement : 187-190.  
   poutres-caissons : 185-190.  
   redondance : 189.  
   résonance : 185.
- Hypalon, plastique : 30.
- Ictinus : 192.
- Il Torrazzo (la grande tour) : 172.
- Imhotep : 13.
- immeuble de la Federal Reserve : 165-167.
- immeubles à structure tubulaire : 156.
- inclinaison : 12-13, 12.
- Indiens d'Amérique : 28, 76, 192.
- inertie : 77.  
   amortisseur dynamique : 233-240.  
   séismes : 77-78.
- infiltration de l'eau par capillarité : 152.
- infrastructure : 106.
- ingénieurs géotechniques : 123, 129, 137,  
 139, 274.
- Inn, pont sur l' : 118.
- inondations : 131-140.
- instabilité : 41, 42.  
   dôme du C. W. Post College : 34-35.  
   élastique : 41, 42.  
   équilibre : 247-250.  
   flambement : 34.  
   formation de cuvette : 48, 49.
- instabilités élastiques : 41.
- Ise, sanctuaire de la déesse du soleil,  
 Japon : 180.
- Isidore de Milet : 22.
- isochronisme : 125.
- isolation : 152.
- isolation parasismique : 76-79.
- isotopes d'hydrogène : 199.
- John Hancock, voir Hancock, tour.
- Johnson, Lyndon : 106.
- Johnstown, inondation : 132-135.
- joints : 64.  
   articulation : 262.  
   barrages en béton : 137.  
   continuité mécanique : 62.  
   cornières « anti-explosion » : 64.  
   corrosion : 262.  
   dalle/poteau : 145.  
   dans les constructions en acier : 262.  
   liaisons rigides ou encastrement : 260.  
   mortier : 151.  
   œillets : 102.  
   panneaux préfabriqués : 82.  
   treillis : 262, 262.
- Justinien, empereur : 201.
- Karman, Theodor von : 35, 210, 237.
- Karman, tourbillons de : 94, 237.
- Kemper, palais des sports de : 42, 43, 44, 45,  
 46, 49-50.  
   Bernoulli, effet : 48.  
   descente : 48.  
   effondrement : 43.  
   formation de cuvette : 48.  
   reconstruction : 49.

- redondance : 49-50.  
 Kevlar : 219.  
 Kheops, pyramide de : 224.  
 Knossos, temple : 182.  
 krak des Chevaliers, Syrie : 191-192.  
 L'Ambiance Plaza : 141-149.  
   comparaison avec le World Trade Center : 221.  
   effondrement : 143-144.  
   plan : 142.  
   séquence de rupture : 148.  
   technique de construction : 141-143.  
 La Guardia, aéroport : 15, 16, 214.  
 Larson-Nielsen, système de préfabrication : 59.  
 Le Gage, barrage : 137.  
 Leibniz, Gottfried Wilhelm : 224.  
 liaisons : 261-262, 261.  
 liaisons rigides ou encastrement : 261-262.  
 Lincoln First Bank, bâtiment de la : 159-161.  
 liquéfaction :  
   des sols : 79.  
   séisme de Loma Prieta : 79.  
 loi :  
   Magna Carta : 202.  
   naturelle : 202.  
 loi de l'énergie minimale ou « loi de la paresse de la nature » : 94.  
 loi de l'équilibre en rotation : 248, 249, 256.  
 loi de l'équilibre en translation : 248.  
 loi des Douze Tables : 201.  
 loi sur l'équilibre en rotation : 248-249, 256.  
 Loma Prieta, séisme (1989) :  
   Cypress Structure : 83.  
   liquéfaction : 79.  
 Machine Enigma : 197.  
 maçonnerie :  
   sèche : 128.  
   séisme : 77-78, 82, 85.  
 Madison Square Garden : 269.  
 magma/roche fondue : 158.  
 Magna Carta : 201-202.  
 maillons/rondelles d'appuis : 102, 111.  
 Mallarmé, Stéphane : 15, 151.  
 Malpasset, barrage de : 135-139.  
   culée : 135, 136.  
   dimensions : 135-139.  
   effondrement : 135-139.  
   *Magna Carta* : 202.  
 Manhattan, pont de : 92.  
 manuscrit de Madrid I : 253.  
 marbre : 155, 157, 160.  
   Acquabianca : 161.  
   flambement : 158, 161.  
   nature : 158.  
   plaques préfabriquées : 155.  
 Marshall, Richard. M. : 187.  
 Massachusetts Institute of Technology (mit) : 165.  
 masses accordées : 166, 167, 236, .  
 Mayapan, Mexique : 192.  
 mécanique quantique : 224.  
 Méïdoum, pyramide de : 10, 10-11, 12, 13.  
 Meitner, Lise : 198.  
 Meloria, bataille de : 124.  
 membranes gonflables : 26, 268.  
   *voir aussi* coques de Bini.  
 Menai, pont du détroit de : 92.  
   méridiens : 22, 22.  
   théorie des membranes : 11.  
 méthode des approximations successives : 224-225.  
 méthodes des différences finies : 224.  
 Mexico, théâtre national : 122.  
 Mexique, séisme (1985) : 81-82.  
 Mianus, pont sur le (Mianus River Bridge) : 107-114, 109.  
   appui pendulaire : 109, 110, 111.  
   assemblage : 109, 111.  
   effet de la charge excentrée : 113.  
   effondrement : 109, 109, 111.  
   évacuations d'eau : 112.  
   inspection : 108.  
   pont à travées cantilever : 108, 109, 109, 110, 111.  
   rapport falsifiés : 114.  
   redondance : 118-119.  
   rouille : 112.  
 Michel-Ange : 21, 159.  
 Mies van der Rohe, Ludwig : 265.  
 Minoens de Crète : 192.  
 Miracles, place des : 125.  
 module d'élasticité : 212, 243.  
 Möhne, barrage de : 132.  
 Moisseiff, Leon : 89, 91-92, 95.  
 monastère de Nara : 180.  
 Morosini, Francesco : 193.  
 mortier : 62.  
 Mossoul, barrage de : 131.  
 Mueser, Rutledge, Johnston & DeSimone : 32.  
 Murphy, C. F., agence : 43.  
 murs :  
   comme extension des poteaux : 258.  
   de contreventement : 143, 263, 264, 265.  
   maçonnerie : 77, 77.  
   porteurs : 264.  
 murs de contreventement : 143, 147, 155, 156, 262-264, 265.  
 murs porteurs : 264.  
 murs-rideaux : 153-156.  
 Nagasaki, bombe atomique : 198-199, 236.  
 Napier, John : 225.  
 Napoléon Ier, empereur : 202.  
 Nervi, Pier Luigi : 22.  
 New Madrid, Missouri, séisme (1811) : 75-76.  
 New York : 227-228, 234.  
   18e Rue Est, effondrement de façade : 181.  
   45e Rue, explosion : 65.  
   codes de la construction : 65, 234.  
   les âges de la construction : 181.  
   loi municipale n°10 : 151.  
 Newton, Charles : 10.  
 Newton, Isaac : 203, 206, 208, 224, 233, 236, 248, 250, 255, 256.

- Niagara-Clifton, pont de : 93.  
 Niigata, séisme (1964) : 247.  
 niveau de la nappe phréatique : 178.  
 nœud de treillis : 52.  
 nœuds : 52, 54.  
 norme applicable aux réservoirs sous pression : 65.  
 Nurague, monuments préhistoriques : 182.  
 Octave : 137.  
 Ohio, pont sur l' : 92, 101.  
 Oklahoma City, immeuble Alfred P. Murrah, attentat : 216-217, 217.  
 Olive View Hospital : 78.  
 Orosco, José : 122.  
 oscillations : 87.  
   équilibre : 247-249.  
   loi de l'énergie minimale ou « paresse de la nature » : 94.  
   pendule : 125.  
 oscillations aérodynamiques des ponts suspendus : 93-94.  
 ossature articulée : 263.  
 outils de calcul : 223-225, 228.  
 oxydation (rouille) : 108.  
   adjuvants : 152.  
   appui pendulaire : 109.  
   capillarité : 152.  
   dans les espaces confinés : 152.  
   façades : 152.  
   joints : 262.  
   pont sur le Mianus : 107-108.  
   rondelles : 113.  
 palais des Beaux-Arts, Mexico : 122.  
 palais des sports de Montevideo, Uruguay : 269.  
 Palazzo Massimo alle Colonne : 196.  
 Pan Am Building : 19.  
 Pan Am, 707 : 65.  
 panneaux de verre, tour Hancock : 162, 164, 168-169.  
 Panthéon : 182, 224.  
   coupole : 20, 21, 30, 224, 227.  
   reconstruction : 227.  
 paraboloïdes hyperboliques : 268, 270.  
 parallèles : 22, 22, 33.  
   théorie des membranes : 33.  
 Parthénon : 182, 192, 193, 194.  
 passerelle en corde : 102, 103, 250.  
 Pavie, tour communale de : 172-177.  
   âge : 182.  
   beffroi : 175.  
 Pavillon de Barcelone : 265.  
 pendule : 105.  
   oscillation : 125.  
   période fondamentale : 235-236.  
 Pentagone, attaque terroriste (2001) : 219-221.  
 Périclès : 192.  
 période fondamentale : 235-236.  
 Peruzzi, Baldassarre : 196.  
 Pétrarque : 171.  
 phare de Pharos : 182.  
 Phidias : 10, 192.  
 pierre :  
   arcs : 253.  
   compression : 241.  
   dômes/coupoles : 267.  
 pieu appuyé en pointe : 123-124, 124.  
 pieu flottant : 123-124, 124.  
 pieux/piles : 123, 124, 181, 274.  
 Pisano, Bonanno : 127.  
 Pise, tour penchée de : 124-129.  
   angle d'inclinaison : 127, 128, 128, 129.  
   câbles : 129.  
   isochronisme : 125.  
   redressement : 127, 129.  
   restauration : 128-129.  
   sol : 127, 127.  
   structure : 126.  
 plaques de granit : 155.  
 plasticité : 245-246.  
 plastiques : 227.  
 poids propre / charge permanente : 11, 27, 30, 56, 233-234, 274.,  
   des pyramides : 11.  
   et la chute du pont Point Pleasant : 131.  
   et les coques de Bini : 27.  
   et les passerelles du Hyatt Regency : 185.  
   uniformité : 32.  
 Point Pleasant Bridge ou pont d'Argent : 101-106.  
   commission d'enquête : 104.  
   concentration de contraintes : 100.  
   dimensions : 101.  
   effondrement : 101-106.  
   essai de Charpy : 105.  
   fatigue du métal : 104-106.  
   maillons : 101-102.  
   cèllets : 102, 102, 103, 104, 104, 105, 106.  
 polyéthylène : 64.  
 pont à travées cantilever : 108.  
 Pontiac Stadium (Michigan), membrane gonflable du : 269.  
 ponts :  
   à haubans : 274, 273.  
   affouillement : 117-118.  
   appui mobile : 239.  
   Benjamin Franklin : 92.  
   Bronx Whitestone Bridge : 88, 92-95.  
   chute de : 107.  
   contraintes exercées sur les poutres : 257.  
   dilatation thermique : 238-239, 238, 239.  
   écoulement : 178.  
   en corde : 103, 103, 250.  
   en corde de fibres végétales : 102.  
   George Washington : 88, 92-93, 272.  
   Golden Gate : 88, 92-93.  
   Hatchie River Bridge : 118-119.  
   Manatthan : 92.  
   Menai, détroit de : 92.  
   Mianus, voir Mianus, pont sur le.  
   Niagara-Clifton : 93.  
   Ohio, sur l' : 92-93.  
   oscillations de torsion : 93, 93.  
   Point Pleasant, voir Point Pleasant Bridge.  
   pont sur l'Inn : 118.  
   Sainte-Trinité, pont de la : 181.  
   San Francisco-Oakland, baie de : 92.  
   Schoharie, voir Schoharie, pont de.  
   soudure, voir aussi ponts suspendus : 108.  
   St Mary : 106.

- Sunshine Skyway, pont de : 273, 274.  
Tacoma Narrow Bridge, voir Tacoma, pont des détroits de.  
treillis : 262, 262.
- ponts en treillis : 262.
- ponts suspendus : 87-89, 92.  
amortisseurs dynamiques : 89, 95.  
baie de San Francisco-Oakland : 92.  
Benjamin Franklin : 92.  
Bronx-Whitestone : 88-95.  
câbles en acier : 101.  
détroit de Menai : 92.  
flexibilité : 105.  
George Washington : 88, 92-93, 272.  
Golden Gate : 88, 92-93.  
Manhattan : 92.  
mouvement de torsion : 93.  
Niagara-Clifton : 93.  
Ohio River : 101.  
oscillations dues au vent : 87-92.  
passerelle en corde : 102, 103, 250.  
St Mary : 106.  
Sunshine Skyway : 273, 274.
- Porta, Giacomo della : 21.
- post-tension : 141, 143.
- poussée latérale : 253.
- poutre à semelle large : 255.
- poutre de rive : 103.
- poutre en appui simple : 254.
- poutre en encorbellement : 45.
- poutre en porte-à-faux : 254-255, 255, 257, 258.
- poutre en treillis verticale : 155.
- poutre Pratt : 262.
- poutre-caisson : 187-190, 186.
- poutre/poteau : 18, 219-220, 250, 253-257, 263.  
axe neutre de la poutre : 253-255, 255.  
caisson : 187-190, 186.  
comme amortisseur : 78.  
dalle, comme extension de : 260, 260.  
de rive : 160-161.  
déformation de la poutre : 254.  
déformation élastique d'une poutre : 245.  
déformation plastique d'une poutre : 245.  
efforts tranchants/cisaillement : 256, 256.  
en appui simple : 254, 254.  
en porte-à-faux : 254, 255.  
encastrée : 255, 254-255, 258.  
poutre en béton armé : 216, 256-257, 257, 258.  
poutres en I : 255, 256.  
réactions des poutres : 255.  
transmission des charges : 254.
- poutres en I : 255, 256.
- prévention : 223-230.
- produits d'étanchéité : 151.
- propension au flambement général : 38.
- propension au flambement local : 38.
- propriétés anisotropes : 33.
- propriétés d'allongement :  
élastique : 100.  
plastique : 100.  
voir aussi ductilité.
- propriétés des matériaux : 223-225.
- propriétés monolithiques : 39.
- propulsion, avion : 97.
- Pruitt-Igoe, tours : 191.
- Ptolémée II : 9.
- pueblos : 192.
- pyramide : 7, 9-13, 12, 21, 52, 53, 56, 182, 224.
- Ramsès II, temple de : 135.
- rayon de giration : 158.
- redondance : 18, 41, 57.  
appui pendulaire : 109, 110.  
charges et : 41.  
dans les langues : 41.  
effondrement du Hyatt Regency : 189.  
Hatchie River Bridge : 118-119.  
immeuble Alfred P. Murrah : 216.  
manque de : 18, 49-57, 119.  
palais des sports de Hartford : 57.  
palais des sports Kemper : 49.  
pont sur le Mianus : 119.  
pont de Schoharie : 118.  
pont sur l'Inn : 118.  
réseau path : 50.  
séismes : 82.  
stabilité et : 42.  
World Trade Center : 214.
- Reid, Lieutenant Colonel : 92-93.
- Reno, Janet : 216.
- réservoirs : 131.
- réservoir hydropneumatique : 65, 66.
- résistance du métal : 105.
- résonance : 94, 165.  
cumul des effets : 236.  
effondrement du Hyatt Regency : 187-188.  
effondrement du pont des détroits de Tacoma : 94.  
séismes : 83-85.
- Reyran, gorges de : 135.
- Rhodes, Colosse de : 10.
- Richter, échelle de : 74-76.
- rigidité : 22, 143.
- Rivera, Diego : 122.
- Robertson, Leslie : 220.
- Ronan Point, immeuble de : 59-64, 61, 67.  
appartement de Ivy Hodge : 59, 60.
- Roosevelt, Franklin D. : 89.
- Roselend, barrage de : 138.
- Royals Arena, Kansas City : 42.
- Ruhr, barrages de la vallée de la (Allemagne) : 132.
- rupture fragile :  
barre à ceilllets : 105-106.  
du verre : 246.  
fatigue du métal et : 104.
- Saarinén, Eero : 159.
- Saint Petersburg, coupole autotendante à : 270.
- Saint-Pierre de Rome : 21, 23, 24, 159, 171, 182.
- Sainte-Sophie, Istanbul : 21-23, 23, 29, 182, 224.
- Salford, Grande-Bretagne : 64.
- San Andreas, faille de : 73, 74, 74.
- San Fernando, séisme (1971) : 78.

- San Francisco, séisme (1906) : 74.  
 San Francisco, séisme (1989) :  
*voir* Loma Pietra, séisme.
- San Francisco-Oakland, pont de la baie de : 74, 92.
- San Marco, campanile (Venise) : 170, 171-172, 173.
- Sanctuaire de la déesse du soleil à Ise, Japon : 180, 181.
- Sansovino, Jacopo : 172.
- Santa Maria del Fiore, cathédrale de : 12, 16, 21, 23, 24.  
 âge : 182.  
 construction : 21, 23.
- Santa Trinita, pont de : 181.
- Schoharie, pont de (Thruway Bridge) : 114-119.  
 affouillement : 115, 116, 117, 118.  
 batardeau : 117.  
 effondrement : 114-119.  
 enrochements : 117.  
 redondance : 109, 118.  
 règles nationales d'inspection : 117.
- Sears Building : 252.
- séismologie : 72.
- semelles, poutre en I : 256.
- Sept Merveilles du monde : 7, 9.
- Sierra, collège de la : 147.
- Siqueiros, David : 122.
- Snelson, Kenneth : 270.
- sol homogène : 122.
- solives : 45, 45, 46, 49.
- solives en treillis : 45.
- sols : 121-130.  
 crêpe de Floride : 123-124.  
 différents types : 80-127, 127, 128.  
 fondations : 274.  
 homogènes : 122.  
 ingénieurs : 274.  
 Mexico : 122-123.  
 mouvements rigides : 122.  
 piles : 123-124, 124.  
 tassements différentiels : 22, 129.  
 tour de Pise : 124-129.
- sommiers/culées : 253, 253.  
 barrage de Malpasset : 135.  
 poussée sur : 253.
- Sostratos de Cnide : 9.
- South Fork Hunting and Fishing Club : 133-134.
- South Fork, barrage de : 132-134.  
 construction : 132, 133.  
 dimensions : 132.  
 effondrement : 132-134.  
 modifications : 133-134, 134.
- sphère isotrope : 35.
- St Mary, pont de : 106.
- St Michael, cathédrale de (Coventry) : 197.
- stabilité : 42.  
 dômes/coupoles : 21-22.  
 murs de contreventement : 143.  
 redondance : 41-42.
- stade olympique : 270.
- Standard Oil of Indiana, *voir* Amoco, tour.
- Stevenson Creek, barrage de : 137.
- Stonehenge : 182.
- Strabon : 71-72, 131.
- Strassmann, Fritz : 198.
- structures : 247-274.  
 aviation : 97-100.  
 cantilever : 108.  
 comportement : 7.  
 dômes/coupoles : 267-268.  
 effet du vent : 155.  
 élasticité : 245-246, 245.  
 éléments : 250-260.  
 équilibre : 247-250.  
 facteurs économiques : 228.  
 informatique : 225.  
 instabilité : 247-250.  
 liaisons : 260, 261.  
 ossatures : 263.  
 outil de calcul : 225.  
 palais des sports Kemper : 43-44.  
 plasticité : 245-246, 245.  
 ponts suspendus : 273-274.  
 propriétés des matériaux : 223, 225-227.  
 propriétés des sols : 121-122.  
 résonance : 236-237.  
 tendues : 273-274.  
 tour de Pise : 124.  
 treillis : 262, 262.  
 treillis tridimensionnel : 263, 263.  
 tubulaires : 219, 221.  
 vibrations : 85.
- subduction : 72, 73.
- suicide : 204.
- Suncoast, dôme de : 271.
- Sunshine Skyway Bridge : 273, 274.
- Superdôme : 266, 267.
- surface en forme de selle : 267.
- système hydropneumatique : 65.
- Tacoma, pont des détroits de : 87, 88, 88, 91.  
 comparaison avec Bronx-Whitstone  
 Bridge : 88.  
 dimensions : 87.  
 effondrement : 91, 91, 93, 95.  
 flexibilité : 88.  
 loi de l'énergie minimale ou « paresse de la nature » : 94.  
 résonance : 94.  
 rupture de câbles : 87.
- Taj Mahal : 182.
- Tangshan, séisme (1976) : 76.
- tassements : 238-239, 239.
- tassements différentiels : 121.
- tectonique des plaques : 72-73, 72, 73.
- Tectum, isolation thermique : 30.
- terrorisme : 213-222.  
 Alfred P. Murrah Building : 216-217, 216.  
 coût des dégâts : 216.  
 Pentagone : 219, 221.  
 prévention : 218.  
 World Trade Center : 214-216, 218-219, 221.
- Texcoco, lac (Mexico) : 122.
- théorie des membranes : 30, 32-34.
- Thruway Bridge, *voir* Schoharie, pont de.
- Timoshenko, Stephen : 35, 212.
- Tinguely, Jean : 59, 65.

- tips : 28, 259.  
 tirants : 178.  
 Titus, empereur de Rome : 195.  
 toiture en forme de bol : 269.  
 toitures :  
   autotendante : 270, 271, 272.  
   en forme de bol : 269, 269.  
   membrane gonflable : 269, 271.  
   roue de bicyclette : 269, 270.  
   système des tentes : 268.  
   tendues : 269.  
 Tokyo, séisme (1923) : 78.  
 torsion : 88-93, 90.  
 Tour infernale, voir Ronan Point (tour).  
 tours :  
   Amoco : 155-159.  
   campanile San Marco : 170, 171-172, 173.  
   communale de Pavie : 172-180.  
   de Babel : 9, 229.  
   de Pise : 124-129.  
   de San Dalmazio : 177.  
   de San Gimignano : 171.  
   « décapitation » : 172.  
   Degli Asinelli : 172.  
   del Mangia (du mangeur) : 171.  
   Il Torrazzo (la grande tour) : 172.  
   médiévales italiennes : 172.  
   Ronan Point : 59-64.  
   Xerox (Rochester) : 159.  
 Transuraniens, éléments : 198.  
 treillis :  
   articulations : 262.  
   barres et barres comprimées : 250, 251.  
   barres rigides ou encastresments : 260.  
   palais des sports Kemper : 45.  
   poutre Pratt : 262.  
   poutre Warren : 262.  
   structure : 262-263.  
   vertical : 155.  
 treillis tridimensionnels : 45-46, 45-46, 52, 54, 263, 263.  
 treillis/ossatures :  
   articulée : 263.  
   barres diagonales : 251.  
   charges verticales : 145.  
   Cypress Structure : 83.  
   déformation latérale : 164.  
   ductilité : 75-76.  
   Empire State Building : 18.  
   flexion sous contrainte thermique : 239.  
   noyau en béton armé : 263.  
   tridimensionnels : 263.  
 tremblements de terres/séismes :  
   aux États-Unis : 75.  
   causes : 71.  
   Charleston : 71, 76-79.  
   constructions en maçonnerie : 78.  
   constructions préfabriquées : 80, 81.  
   Cypress Structure : 83-86.  
   échelle de Richter : 74-76.  
   en Arménie (1988) : 81-82.  
   et l'isolation thermique : 76.  
   et les animaux : 76.  
   fissures diagonales : 77, 78.  
   fissures en forme de X : 78-79.  
   force de cisaillement : 78-79.  
   frottement : 72.  
   inertie : 77, 78, 81.  
   Japon : 75, 79.  
   liquéfaction : 79, 79, 82.  
   Loma Prieta (1989) : 73-76, 81-83, 86, 224.,  
   magnitude : 74-75.  
   maisons en bois : 75-77.  
   Mexico (1985) : 102.  
   New Madrid (1811) : 75-76.  
   Niigata (1964) : 79, 79.  
   plaques tectoniques : 71-73, 73.  
   redondance : 82.  
   résonance : 83, 85, 94.  
   Sainte-Sophie : 224.  
   San Fernando (1971) : 78.  
   San Francisco (1906) : 74.  
   Tangshan (1976) : 76.  
   Tokyo (1923) : 78.  
 Triodetic, système breveté : 30.  
 Turing, Alan : 197.  
 U. S. S. Cole, attaque terroriste contre : 218-219.  
 Utica, salle des sports d' : 269, 270.  
 vent : 155.  
   codes de la construction : 162.  
   distorsion : 34.  
   dômes/coupoles : 32-35.  
   torsion : 88.  
 Vespasien, empereur de Rome : 195.  
 Vinci, Léonard de : 253.  
 voilement : 38, 39.  
 Voltaire : 71.  
 Vonnegut, Kurt : 198.  
 voussoirs : 253, 253.  
 Warren, poutre : 262.  
 World Trade Center : 228, 274.  
   attentats du 11 septembre 2001 et effondrement : 218-219, 221.  
   bombardement de 1993 : 214-215, 215.  
   comparaison avec l'effondrement de l'Ambiance Plaza : 221.  
 Wright, Frank Lloyd : 78.  
 Xerox, tour : 159.  
 Zeus olympien, statue de : 10.

# Table

<b>Préface</b>	5
<b>Introduction</b>	7
<i>Chapitre 1</i> <b>La première défaillance de la structure d'un ouvrage</b>	9
<i>Chapitre 2</i> <b>Miracle sur la 34<sup>e</sup> Rue</b>	15
<i>Chapitre 3</i> <b>Le Panthéon restera-t-il toujours debout ?</b>	21
<i>Chapitre 4</i> <b>Par manque de redondance</b>	41
<i>Chapitre 5</i> <b>Big bangs</b>	59
<i>Chapitre 6</i> <b>Le jour où la terre trembla</b>	71
<i>Chapitre 7</i> <b>Galloping Gertie</b>	87
<i>Chapitre 8</i> <b>Quand le métal fatigue</b>	97
<i>Chapitre 9</i> <b>Des autoroutes pour l'éternité</b>	107
<i>Chapitre 10</i> <b>Les faiblesses de notre mère la Terre</b>	121
<i>Chapitre 11</i> <b>Vallée des larmes</b>	131
<i>Chapitre 12</i> <b>Le château de cartes</b>	141

<i>Chapitre 13</i> <b>Dermatologie structurale</b>	151
<i>Chapitre 14</i> <b>Mort de vieillesse</b>	171
<i>Chapitre 15</i> <b>Le plus grave effondrement de structure de l'histoire des États-Unis</b>	183
<i>Chapitre 16</i> <b>Politiques de destruction</b>	191
<i>Chapitre 17</i> <b>La structure de la loi</b>	201
<i>Chapitre 18</i> <b>La terreur venue du ciel</b>	213
<i>Chapitre 19</i> <b>Conclusion : pouvons-nous prévenir de futures catastrophes ?</b>	223
<b>Annexes</b>	231
<i>Annexe A</i> <b>Charges</b>	233
<i>Annexe B</i> <b>Contrainte et déformation</b>	241
<i>Annexe C</i> <b>Matériaux de structure</b>	245
<i>Annexe D</i> <b>Structures</b>	247
<b>Index</b>	275