

Pourquoi
les choses
tiennent
debout

Le livre de référence de
ELON MUSK

STRUC TURES

**JAMES
EDWARD
GORDON**

JAMES EDWARD GORDON

STRUC TURES

Pourquoi les choses
tiennent debout

Préface d'Aurelio Muttoni

Traduit de l'anglais (Royaume-Uni)
par Anatole Muchnik

quanto

Version originale : *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*
Copyright © J. E. Gordon, 1978

Traduction française : Anatole Muchnik

Éditorial : May Yang
Révision scientifique : Rémy Charbonnier
Maquette et mise en page : Kim Nanette
Image de couverture : © rawpixel

Première édition française 2022
© Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne
Quanto est un label des Presses polytechniques et universitaires romandes
ISBN 978-2-88915-450-0

Tous droits réservés
Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support
que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur

Imprimé en France

Préface

Comment les structures fonctionnent-elles? Pourquoi les matériaux qui les composent résistent-ils ou se déforment-ils? Ces questions peuvent être appréhendées de plusieurs façons. Premièrement, en se basant sur les « méthodes scientifiques » classiques, c'est-à-dire en déduisant les réponses de manière démonstrative à l'aide des lois fondamentales de la physique. Ou de manière intuitive, à partir de l'expérience acquise dès notre plus tendre enfance, en jouant avec l'équilibre de notre corps, en observant comment se déforme un fil de fer sous la pression de nos doigts ou comment se rompt une branche sur laquelle nous avons essayé de nous asseoir. C'est cette seconde approche qu'a suivie James E. Gordon dans ce magnifique ouvrage. S'il dispose de connaissances expertes dans le domaine des matériaux, des structures navales et aéronautiques, il est aussi un auteur brillant et féru d'histoire, capable de traiter de ces domaines avec une qualité, une intuition et surtout une rigueur exemplaires. Sa vaste culture lui permet en outre d'aborder toutes les familles de structures: du monde animal et végétal jusqu'aux ouvrages des ingénieurs et des architectes, rien n'échappe à sa plume enthousiaste. Le résultat est passionnant. *Structures: pourquoi les choses tiennent debout* peut être lu sans aucun prérequis spécifique; il suffit d'un peu de curiosité pour vous embarquer au cœur des structures et des matériaux.

Je recommande cette lecture tant aux ingénieurs, déjà familiers avec la théorie des structures, qu'à toutes les personnes désireuses d'en comprendre le fonctionnement sans pour autant disposer du bagage scientifique adéquat. Pour les premiers, ce sera un complément intéressant qui permettra, par le biais d'analogies avec d'autres domaines et de rappels historiques passionnants, de replacer leurs connaissances dans une perspective plus générale. Les néophytes seront quant à eux surpris de découvrir combien le fonctionnement

d'une structure – que cette dernière appartienne au monde animal et végétal ou qu'elle soit le fruit de l'intelligence humaine – peut être si facilement compréhensible.

Imaginer, penser une structure, choisir ou créer une forme adaptée aux exigences d'un projet architectural ou d'un ouvrage d'art : le travail des ingénieurs autour de ces questions est heureusement en train d'évoluer. Les progrès techniques et informatiques ont facilité l'étude et le dimensionnement des structures et déchargé les concepteurs de calculs fastidieux. Néanmoins, pour savoir concevoir, il reste indispensable de connaître les solutions structurales possibles et, surtout, d'avoir assimilé leur fonctionnement. Dans ce contexte, le livre de James E. Gordon constitue non seulement un bel outil permettant de se forger une « culture générale » dans ce domaine, mais également une opportunité rare d'apprendre à analyser et comprendre une structure sans pour cela recourir au calcul.

Cet ouvrage parle de structures, mais aussi de matériaux. Les nouveaux défis d'aujourd'hui rendent le choix des matériaux appropriés et la compréhension de leurs caractéristiques mécaniques plus importants que jamais. Pour toutes ces raisons, ce livre, bien que rédigé à la fin des années 1970, reste d'actualité. Sa relecture, plus de 40 ans après la première, m'a procuré un plaisir tout aussi intact.

Aurelio Muttoni
Lausanne, avril 2022

Sommaire

Préface	9
Liste des planches	13
Avant-propos	15
Avertissement de l'éditeur	17
1 Les structures dans notre vie <i>ou comment communiquer avec les ingénieurs</i>	19
Première partie	
LA DIFFICILE NAISSANCE DE LA SCIENCE DE L'ÉLASTICITÉ	
2 Pourquoi les structures supportent des charges <i>ou l'élasticité des solides</i>	37
3 L'invention de la contrainte et de la déformation <i>ou le baron Cauchy et le déchiffrement du module de Young</i>	49
4 Concevoir pour la sécurité <i>ou peut-on vraiment se fier aux calculs de résistance?</i>	65
5 Énergie de contrainte et mécanique moderne de la rupture <i>Avec une digression à propos des arcs, des catapultes et des kangourous</i>	77
Deuxième partie	
STRUCTURES DE CONTRAINTE	
6 Structures de contrainte et récipients sous pression <i>avec quelques remarques à propos de bouilloires, de chauve-souris et de jonques chinoises</i>	121
7 Des assemblages, des attaches et des gens <i>mais aussi du fluage et des roues de chariot</i>	141
8 Matériaux mous et structures vivantes <i>ou comment concevoir un ver de terre</i>	159

Troisième partie

COMPRESSION ET STRUCTURES SOUPLES

- | | | |
|----|---|-----|
| 9 | À propos de murs, d'arcades et de barrages
<i>ou de « tours coiffées de nuées » et de stabilité
de la maçonnerie</i> | 181 |
| 10 | Quelques mots sur les ponts
<i>ou Saint-Bénézet et Saint-Isambard</i> | 207 |
| 11 | Des avantages d'être une poutre
<i>avec quelques observations sur les toits,
les fermes et les mâts</i> | 221 |
| 12 | Mystères du cisaillement et de la torsion
<i>ou Polaris et la chemise de nuit coupée en biais</i> | 257 |
| 13 | Les diverses façons de rompre en compression
<i>ou les sandwiches, les crânes et le Dr Euler</i> | 285 |

Quatrième partie

CE QUI A EU POUR CONSÉQUENCE...

- | | | |
|----|---|-----|
| 14 | Philosophie de la conception
<i>ou la forme, le poids et le coût</i> | 315 |
| 15 | Au chapitre des accidents
<i>étude du péché, de l'erreur et de la fatigue des métaux</i> | 339 |
| 16 | Efficacité et esthétique
<i>ou le monde où il nous est donné de vivre</i> | 373 |

Annexe 1

<i>Manuels et formules</i>	395
----------------------------	-----

Annexe 2

<i>La théorie des poutres</i>	399
-------------------------------	-----

Annexe 3

<i>La torsion</i>	407
-------------------	-----

Annexe 4

<i>Efficacité des colonnes et des panneaux soumis à des charges de compression</i>	409
--	-----

Crédits photographiques	413
-------------------------	-----

À propos de l'auteur	415
----------------------	-----

1 Les structures dans notre vie

*ou comment communiquer
avec les ingénieurs*

Partis de l'est, les humains trouvèrent une large vallée en Mésopotamie et s'y installèrent. Ils se dirent les uns aux autres : « Au travail pour fabriquer des briques ! Au travail pour les cuire au four ! » Ils utilisèrent les briques comme pierres de construction et du goudron comme mortier. Puis ils se dirent : « Au travail pour bâtir une ville, avec une tour dont le sommet touche les cieux ! Ainsi nous rendrons notre nom célèbre, et nous éviterons d'être dispersés sur toute la surface de la terre. » Le Seigneur descendit des cieux pour voir la ville et la tour que les êtres humains bâtissaient. Après quoi il se dit : « Eh bien, les voilà tous qui forment un peuple unique et parlent la même langue ! S'ils commencent ainsi, rien désormais ne les empêchera de réaliser tout ce qu'ils projettent. Allons ! Descendons, embrouillons leur langage, et qu'ils ne se comprennent plus les uns les autres. » Le Seigneur les dispersa de là sur l'ensemble de la terre, et ils durent abandonner la construction de la ville. Voilà pourquoi celle-ci porte le nom de Babel. C'est là, en effet, que le Seigneur a embrouillé le langage des hommes, et c'est à partir de là qu'il a dispersé les humains sur la terre entière.

Genèse 11.2-9 (Bible Nouvelle français courant)

Une structure peut se définir comme « tout assemblage de matériaux conçu pour supporter des charges » et l'étude des structures est l'une des branches traditionnelles de la science. La défaillance d'une structure créée par ingénierie risque toujours d'être meurtrière, alors on comprend que les ingénieurs mettent un soin particulier à étudier leur comportement. Malheureusement, à chaque fois qu'ils évoquent leur domaine auprès d'un béotien, il y a toujours quelque chose qui

ne passe pas, comme s'ils parlaient une langue étrangère, au point que certains d'entre nous finissent par se persuader que l'étude des structures et de la façon dont elles soutiennent des charges est incompréhensible, sans intérêt et franchement ennuyeuse.

Les structures sont pourtant si omniprésentes dans notre vie que nous aurions tort de les ignorer : il n'est guère de plante, d'animal ou de construction humaine qui n'ait à supporter de forces mécaniques plus ou moins importantes sans rompre, si bien que tout, ou presque, est une structure d'un genre ou d'un autre. Quand on parle de structure, il faut en vérité se demander pourquoi il arrive que les bâtiments et les ponts s'effondrent, bien sûr, ou pourquoi les machines et les avions se cassent, mais aussi comment le ver de terre en est venu à avoir cette forme-là et pourquoi une chauve-souris peut voler à travers un rosier sans se déchirer les ailes. Comment fonctionnent nos tendons ? Pourquoi se fait-on un « lumbago » ? Qu'est-ce qui rendait les ptérodactyles si légers ? Pourquoi les oiseaux ont-ils des plumes ? Comment nos artères fonctionnent-elles ? Que peut-on faire pour les enfants handicapés ? Pourquoi les voiliers sont-ils ainsi grésés ? Pourquoi fallait-il qu'un arc soit si difficile à tendre ? Pourquoi dans l'Antiquité retirait-on les roues des chars pendant la nuit ? Comment fonctionnait une catapulte grecque ? Pourquoi le roseau est-il secoué par le vent et le Parthénon est-il si beau ? Un ingénieur peut-il tirer des enseignements des structures naturelles ? Qu'ont à apprendre les médecins, les biologistes, les peintres ou les archéologues auprès des ingénieurs ?

Le chemin pour comprendre les vraies raisons qui font que les structures tiennent ou qu'elles se cassent s'est avéré beaucoup plus âpre et plus long qu'on ne l'aurait cru. Nous n'avons que récemment comblé assez de lacunes de notre connaissance pour apporter à ces questions des réponses utiles ou intelligentes. Naturellement, à mesure que s'assemblent les pièces du puzzle, le tableau d'ensemble se précise : le domaine tout entier cesse d'être celui de spécialistes relativement étroits et s'ouvre de plus en plus aux individus ordinaires, qui le trouveront appréciable et utile dans une vaste gamme de questions d'intérêt général.

Le présent ouvrage traite de la vision moderne de l'élément structurel dans la nature, la technologie et la vie quotidienne. Nous verrons que la nécessité d'être résistant et de supporter diverses charges essentielles a influencé l'évolution de tout type de créatures et d'instruments – et notamment de l'être humain.

Structure vivante

Les structures biologiques sont apparues longtemps avant les structures artificielles. Avant la vie sur Terre, il n'existait rien de tel qu'une structure intentionnelle – seulement des montagnes et des tas de sable et de roche. En revanche, la plus élémentaire des formes de vie est déjà une réaction chimique finement équilibrée, autoentretenu, qu'il faut dissocier et protéger du non-vivant. La nature ayant inventé la vie – et avec elle l'individualisme –, il a bien fallu trouver une sorte de contenant capable de la conserver. Il fallait que cette pellicule, ou cette membrane, possède un minimum de résistance mécanique, à la fois pour contenir la matière vivante et lui offrir un peu de protection contre les forces extérieures.

Si, comme cela semble possible, certaines des premières formes de vie étaient d'infimes gouttelettes flottant dans l'eau, alors une barrière très fine et très simple, peut-être rien de plus que la tension superficielle existant à la jonction de liquides distincts, aura pu suffire. Progressivement, à mesure que se sont multipliées les créatures vivantes, la vie est devenue plus concurrentielle et les animaux qui étaient faibles, globulaires et immobiles se sont trouvés en position désavantageuse. La peau s'est durcie et l'évolution a amélioré divers modes de locomotion. Des animaux plus grands, multicellulaires, sont apparus, capables de mordre et de nager vite. La survie a alors consisté à chasser ou être chassé, manger ou être mangé. Aristote a parlé d'*allélophagie* – dévoration mutuelle – et Darwin de sélection naturelle. En tout cas, l'avancée de l'évolution a reposé sur le développement de matériaux biologiques plus solides et de structures vivantes plus ingénieuses.

Les premiers et les plus primitifs des animaux étaient essentiellement constitués de matières molles, non seulement parce

que celles-ci permettent plus facilement de se tortiller et de s'étirer dans diverses directions, mais aussi parce que les tissus mous sont souvent résistants (nous y reviendrons), alors que les tissus rigides, comme les os, sont plutôt cassants. En outre, le recours aux matières rigides pose des difficultés en matière de croissance et de reproduction. Par exemple, l'acte de l'accouchement suppose toute une ingénierie de contraintes élevées et de grandes flexions. Il demeure que le développement du fœtus vertébré à partir de sa conception, comme celui des structures naturelles en général, constitue à certains égards un passage du mou au dur, et ce processus de durcissement se poursuit après la naissance du bébé.

On a l'impression que la nature n'a admis qu'avec réticence l'usage de matériaux rigides mais, à mesure que les animaux sont devenus plus grands et qu'ils sont sortis de l'eau pour gagner la terre ferme, la plupart ont développé et tiré parti d'un squelette rigide, de dents, parfois même de cornes et d'une carapace. Mais les animaux ne sont pas pour autant devenus des mécaniques fondamentalement rigides, comme le sont à peu près toutes nos machines modernes. Le squelette est généralement resté, mais en tant que partie mineure de l'ensemble et, comme nous le verrons, les parties molles ont souvent été astucieusement exploitées pour limiter les charges pesant sur le squelette et le protéger des conséquences de sa fragilité.

Le corps de la plupart des animaux est essentiellement composé de matières souples mais on ne peut pas forcément en dire autant des plantes. Les petites variétés, plus primitives, sont généralement molles, mais une plante n'est pas en mesure de chasser pour se nourrir ni de fuir ses ennemis. En revanche, elle peut dans une certaine mesure se protéger en poussant haut et, ce faisant, obtenir peut-être un léger surcroît de soleil et de pluie. Les arbres, en particulier, font preuve d'une intelligence extraordinaire pour s'étirer et récolter l'énergie diffuse et intermittente du soleil tout en subissant le harcèlement du vent – et toujours de la façon la plus rentable possible. Les très grands arbres peuvent atteindre une hauteur de 110 mètres, ce qui en fait, et de loin, les plus grandes et les plus durables des créatures vivantes. Mais pour qu'une plante atteigne

ne serait-ce que le dixième de cette hauteur, sa structure principale doit être légère et rigide à la fois ; cette caractéristique, nous le verrons, recèle certains enseignements d'importance pour l'ingénieur.

Structure technologique

De toutes les merveilles de la nature, la plus étonnante, c'est l'homme. C'est lui qui, poussé par les vents orageux, traverse les mers blanchissantes, et fend les flots qui mugissent autour de lui ; il fatigue la terre, cette déesse vénérable, immortelle, inépuisable, en déchirant son sein chaque année avec la charrue que traîne un laborieux coursier.

L'oiseau au vol rapide, et la bête farouche et l'habitant des eaux ne peuvent échapper à l'industrie de l'homme, aux replis de ses filets nouveaux.

Sophocle, *Antigone* (440 av. J.-C., trad. M. Benloew et M. Bellaguet)

Benjamin Franklin (1706-1790) a dit de l'être humain que c'est « un animal qui fait des outils ». En vérité, nombreux sont les animaux qui fabriquent et emploient des outils relativement grossiers et leurs maisons sont souvent de bien meilleure qualité que celles construites par les humains à l'état sauvage. Il est sans doute difficile d'indiquer le moment précis du développement humain où l'on peut dire que sa technologie a nettement dépassé celle des bêtes. Peut-être est-ce arrivé plus tard qu'on ne le pense, surtout si les premiers humains étaient arboricoles.

Quoi qu'il en soit, en termes temporels aussi bien que techniques, le fossé entre les bâtons et les cailloux des premiers humains et les beaux objets sophistiqués de la fin de l'âge de pierre est immense. Certaines cultures pré-métalliques ont survécu en des points isolés du globe jusque récemment et l'on peut encore admirer nombre de leurs instruments dans les musées. Fabriquer des structures importantes sans l'aide du métal demande un instinct de la répartition et un sens des contraintes que tous les ingénieurs modernes ne possèdent pas, loin de là ; car l'emploi du métal, si commode par sa résistance

**« Il y a un bon bouquin qui s'appelle
Structures : pourquoi les choses tiennent debout.
Il est vraiment génial pour s'initier au design
des structures. J'ai appris énormément grâce à lui. »**

Elon Musk, à propos de l'aventure Space X

Si notre monde ressemble à ce qu'il est, si les choses se maintiennent les unes aux autres sans tomber, c'est grâce à des principes simples et universels. Qu'il s'agisse d'une cathédrale plusieurs fois centenaire, de votre habitation, d'un avion, d'un bateau, d'un kangourou, d'une coquille d'œuf ou de vos propres articulations, tout n'est au fond qu'histoire de structures. Comprendre comment elles fonctionnent, c'est comprendre l'organisation du monde, rien de moins (et construire ensuite ce que bon vous semble, comme des fusées, par exemple).

Affaire de spécialistes que tout cela ? Absolument pas ! J.E. Gordon le démontre dans ce livre plein d'esprit, sans simplification ni jargon excessifs : comprendre une structure est un jeu d'enfant pour qui sait observer. Il est même probable qu'après avoir lu des chapitres comme « l'avantage d'être une poutre » ou « comment concevoir une vis », vous serez très tentés de vous lancer dans la construction de votre propre plancher, d'une catapulte ou d'un pont suspendu.

Un classique de la littérature pop science anglo-saxonne destiné à toutes et tous, incultes en la matière comme bricoleurs amateurs ou ingénieurs et architectes, une référence intemporelle et jamais égalée.

« Un auteur brillant et féru d'histoire,
capable de traiter de ces domaines avec une qualité,
une intuition et surtout une rigueur exemplaires. »

Professeur Aurelio Muttoni, École polytechnique
fédérale de Lausanne (EPFL)

« Un texte riche et accessible, personnel,
plein d'esprit et d'ironie. »

Scientific American

« Vous serez conquis par le charme fou de cette conversation
à bâtons rompus avec un ingénieur érudit passionné par
sa discipline, qui vous en dévoilera les fondamentaux
et vous racontera une histoire jalonnée de merveilles
de technologie mais aussi d'erreurs croustillantes. »

Architect's Journal

quanto

www.editionsquanto.com

25.50 €

ISBN 978-2-88915-450-0



9 782889 154500 >