

---

collection génie civil dirigée par Jacky Mazars

---

# Chocs et impacts sur les matériaux et les structures

*de la théorie aux méthodes de l'ingénieur*

Patrice Bailly

 hermes

Lavoisier

---

---

Chocs et impacts sur les matériaux et les structures

© 2013, Lavoisier, Paris

[www.editions.lavoisier.fr](http://www.editions.lavoisier.fr)

ISBN 978-2-7462-4519-8

ISSN 1771-9011

---

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

# **Chocs et impacts sur les matériaux et les structures**

*de la théorie aux méthodes de l'ingénieur*

Patrice Bailly

**hermes**  
**Science**  
—publications—

*Lavoisier*

---

DIRECTION ÉDITORIALE FÉLIX DARVE

*Collection dirigée par JACKY MAZARS*

---

Jean-Pierre OLLIVIER, Jean-Michel TORRENTI et Myriam CARCASSÈS –  
Propriétés physiques du béton et de ses constituants, 2012

Christian CREMONA – Approche probabiliste de la performance des  
structures, 2010

Denys BREYSSE – Maîtrise des risques en génie civil 1, 2 et 3, 2009

Maurice LEMAIRE *et al.* – Fiabilité des structures :  
couplage mécano-fiabiliste statique, 2005

Roberto NOVA – Fondements de la mécanique des sols, 2005

Patrick PAULTRE – Dynamique des structures, 2005

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	13
<b>PREMIÈRE PARTIE. DYNAMIQUE DES SOLIDES</b> . . . . .	17
<b>Chapitre 1. Mouvements dans les solides</b> . . . . .	19
1.1. Représentation du milieu . . . . .	19
1.1.1. Cadre de la mécanique des milieux continus . . . . .	19
1.1.2. Représentation du mouvement . . . . .	20
1.1.3. Représentation des efforts intérieurs . . . . .	21
1.2. Equations de l'élastodynamique. . . . .	23
1.2.1. Equations de Navier . . . . .	23
1.2.2. Ondes de déformation . . . . .	25
1.2.2.1. Décomposition de Helmholtz. . . . .	25
1.2.2.2. Ondes P . . . . .	25
1.2.2.3. Ondes S . . . . .	26
1.2.2.4. Ondes planes . . . . .	26
1.2.2.5. Ondes P en symétrie sphérique. . . . .	27
1.3. Ondes monodimensionnelles . . . . .	28
1.3.1. Etat uniaxial de contrainte . . . . .	28
1.3.2. Etat uniaxial de déformation . . . . .	29
1.3.3. Solution de d'Alembert . . . . .	30
1.4. Ondes harmoniques . . . . .	31
1.4.1. Définitions . . . . .	31
1.4.2. Dispersion des ondes . . . . .	33
1.4.3. Dispersion des ondes dans une barre. . . . .	34

1.4.3.1. Solution de « Love Rayleigh » . . . . .	34
1.4.3.2. Solution de Pochhammer et Chree. . . . .	36
1.5. Viscoélasticité . . . . .	38
1.5.1. Représentation d'un comportement rhéologique. . . . .	38
1.5.1.1. Représentation et modèles . . . . .	38
1.5.1.2. Construction des modèles rhéologiques . . . . .	39
1.5.2. Fonctions fluage et relaxation. . . . .	40
1.5.2.1. Formulation . . . . .	40
1.5.2.2. Aspect tridimensionnel . . . . .	41
1.5.3. Modèles rhéologiques . . . . .	42
1.5.3.1. Modèle de Kelvin-Voigt . . . . .	42
1.5.3.2. Modèle de Maxwell . . . . .	43
1.5.3.3. Modèle linéaire standard . . . . .	44
1.5.4. Modules complexes. . . . .	45
1.5.5. Ondes dans les milieux viscoélastiques . . . . .	47
1.5.5.1. Equation de propagation . . . . .	47
1.5.5.2. Equation de dispersion. . . . .	49
<b>Chapitre 2. Chocs de solides.</b> . . . . .	<b>53</b>
2.1. Discontinuité de contrainte et de vitesse . . . . .	53
2.1.1. Equations de conservation. . . . .	53
2.1.1.1. Propagation d'une discontinuité . . . . .	53
2.1.1.2. Conservation de la masse . . . . .	54
2.1.1.3. Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	55
2.1.1.4. Conservation de l'énergie . . . . .	55
2.1.2. Diagramme d'état . . . . .	56
2.2. Marche des ondes . . . . .	58
2.2.1. Diagramme de Lagrange. . . . .	58
2.2.2. Réflexion sur une extrémité libre. . . . .	59
2.2.3. Réflexion sur une extrémité fixe . . . . .	61
2.2.4. Diffraction à une interface. . . . .	62
2.2.5. Ondes et modes . . . . .	64
2.3. Chocs de solides . . . . .	66
2.3.1. Choc de deux solides . . . . .	66
2.3.2. Chocs successifs. . . . .	72
2.3.3. Piéteur d'onde et écaillage . . . . .	73
2.4. Chocs sur des solides viscoélastiques . . . . .	75
2.4.1. Conditions à l'interface . . . . .	75
2.4.1.1. Kelvin-Voigt . . . . .	76
2.4.1.2. Maxwell . . . . .	77

2.4.2. Choc d'un solide élastique sur un solide viscoélastique . . . . .	79
2.4.3. Choc de deux solides viscoélastiques . . . . .	80
2.4.4. Propagation d'un choc dans un solide de Maxwell . . . . .	81
<b>Chapitre 3. Ondes et chocs en milieu non linéaire . . . . .</b>	<b>83</b>
3.1. Phénomènes irréversibles . . . . .	83
3.1.1. Vitesse d'impact. . . . .	83
3.1.2. Trajets de chargements. . . . .	84
3.1.3. Vitesse de déformation. . . . .	85
3.1.4. Cisaillement et plasticité. . . . .	87
3.1.4.1. Plasticité et dynamique . . . . .	87
3.1.4.2. Viscoplasticité . . . . .	88
3.1.5. Comportements sous forte pression . . . . .	90
3.2. Cisaillement adiabatique . . . . .	91
3.2.1. Dynamique et thermique. . . . .	91
3.2.2. Condition de cisaillement adiabatique. . . . .	94
3.3. Propagation en état uniaxial de contrainte. . . . .	96
3.3.1. Matériau élastoplastique . . . . .	96
3.3.2. Matériau viscoplastique . . . . .	101
3.4. Etat uniaxial de déformation. . . . .	103
3.4.1. Matériau métallique . . . . .	103
3.4.2. Géomatériau . . . . .	108
3.5. Ondes de choc . . . . .	109
3.5.1. Origine du phénomène. . . . .	109
3.5.2. Compactage au passage d'une onde de choc . . . . .	111
3.5.3. Notion de loi d'état . . . . .	114
<b>Chapitre 4. Essais dynamiques sur matériaux . . . . .</b>	<b>117</b>
4.1. Essais dynamiques. . . . .	117
4.1.1. Moyens d'essai . . . . .	117
4.1.2. Difficulté spécifique . . . . .	118
4.2. Barres de Hopkinson . . . . .	120
4.2.1. Dispositif . . . . .	120
4.2.2. Principe de l'essai. . . . .	120
4.2.3. Analyse de l'essai. . . . .	123
4.2.4. Types de sollicitations . . . . .	125
4.3. Essai par impact direct . . . . .	125
4.3.1. Dispositif . . . . .	125
4.3.2. Analyse de l'essai. . . . .	126



4.4. Essai d'impact de Taylor . . . . .	126
4.4.1. Principe de l'essai . . . . .	126
4.4.2. Analyse simplifiée . . . . .	127
4.5. Impact de plaque . . . . .	128
4.5.1. Dispositifs . . . . .	128
4.5.2. Eléments d'analyse . . . . .	129
<b>DEUXIÈME PARTIE. DYNAMIQUE DES STRUCTURES . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>Chapitre 5. Impact sur une structure simple . . . . .</b>	<b>133</b>
5.1. Structure élémentaire . . . . .	133
5.1.1. Système linéaire à un degré de liberté . . . . .	133
5.1.2. Chargement de courte durée . . . . .	136
5.2. Spectre de réponse à un choc . . . . .	137
5.2.1. Impulsion « créneau » . . . . .	137
5.2.2. Divers types d'impulsions . . . . .	142
5.2.3. Chargement alterné . . . . .	143
5.2.4. Facteur d'amplification dynamique . . . . .	146
5.3. Courbes iso dommage . . . . .	148
5.3.1. Chargement impulsif . . . . .	148
5.3.2. Chargement alterné . . . . .	150
5.4. Modélisation d'une structure réelle . . . . .	151
5.4.1. Définition d'un système équivalent . . . . .	151
5.4.2. Poutres en flexion . . . . .	153
5.4.3. Choc sur une poutre . . . . .	154
5.4.4. Souffle sur une poutre . . . . .	157
5.4.5. Choc sur une masse portée par un mat . . . . .	159
5.4.6. Choc sur une construction . . . . .	161
<b>Chapitre 6. Collisions de structures . . . . .</b>	<b>165</b>
6.1. Chocs de structures élastiques . . . . .	165
6.1.1. Equations du mouvement . . . . .	165
6.1.2. Impact d'un projectile relativement souple . . . . .	166
6.1.3. Couplage lors d'un choc de deux structures . . . . .	167
6.1.4. Chute d'un corps rigide sur une structure souple . . . . .	170
6.2. Choc avec écrasement . . . . .	171
6.2.1. Phénomènes d'écrasement . . . . .	171
6.2.2. Force d'impact . . . . .	177

6.3. Classification des chocs . . . . .	181
6.3.1. Choc dur et choc mou . . . . .	181
6.3.2. Choc avec rebond ou écrasement. . . . .	182
<b>Chapitre 7. Explosions et souffles . . . . .</b>	<b>185</b>
7.1. Explosions accidentelles . . . . .	185
7.1.1. Importance du risque d'explosion . . . . .	185
7.1.2. Processus d'explosion de gaz . . . . .	186
7.1.2.1. Conservation de la masse . . . . .	186
7.1.2.2. Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	187
7.1.2.3. Conservation de l'énergie . . . . .	188
7.1.2.4. L'énergie. . . . .	190
7.1.3. Explosion avec confinement . . . . .	190
7.2. Onde de pression. . . . .	191
7.2.1. Onde externe issue d'une détonation . . . . .	191
7.2.1.1. Les caractéristiques . . . . .	191
7.2.1.2. Règles de similitude . . . . .	192
7.2.1.3. Similitude de Sachs . . . . .	193
7.2.1.4. Similitude de Hopkinson . . . . .	193
7.2.1.5. La référence TNT . . . . .	196
7.2.1.6. La modélisation. . . . .	197
7.2.2. Onde externe issue d'une déflagration. . . . .	197
7.3. Action d'une explosion sur une structure . . . . .	199
7.3.1. Réflexion d'une onde de choc . . . . .	199
7.3.2. Spectre de réponse à une détonation . . . . .	200
7.3.3. Modèle simplifié d'une action sur une structure . . . . .	201
7.4. Couplage souffle structure . . . . .	205
7.4.1. Conditions de couplage . . . . .	205
7.4.2. Approche linéaire du couplage . . . . .	208
<b>Chapitre 8. Réponse mécanique des poutres . . . . .</b>	<b>215</b>
8.1. Modèles dynamiques de poutre . . . . .	215
8.1.1. Notations . . . . .	215
8.1.2. Modèle de Bernoulli . . . . .	216
8.1.3. Modèle de Rayleigh . . . . .	218
8.1.4. Modèle de Timoshenko . . . . .	219
8.2. Impacts sur les poutres . . . . .	222
8.2.1. Adaptation du modèle à l'échelle de temps. . . . .	222

8.2.1.1. Mise en place de la flexion . . . . .	222
8.2.1.2. Influence des conditions aux limites . . . . .	223
8.2.2. Impact au centre d'une poutre . . . . .	224
8.2.3. Poutre sollicitée par un souffle . . . . .	227
8.2.4. Sollicitation dans un tronçon de poutre sous impact . . . . .	232
8.3. Calcul par superposition modale . . . . .	236
8.3.1. Modes propres de déformation . . . . .	236
8.3.2. Projection sur base modale . . . . .	239
8.3.3. Exemple d'un souffle sur un mur. . . . .	240
8.3.4. Fonction de transfert par un élément en flexion . . . . .	246
8.4. Flambement dynamique . . . . .	249
8.4.1. Equation du mouvement en flambement élastique . . . . .	249
8.4.2. Réponse à une impulsion . . . . .	251
<b>Chapitre 9. Réponses de structures à plusieurs degrés de liberté. . . . .</b>	<b>255</b>
9.1. Modélisation par un système discret . . . . .	255
9.1.1. Equations du mouvement . . . . .	255
9.1.2. Recherche de modes propres . . . . .	257
9.2. Résolution par superposition modale. . . . .	259
9.2.1. Projection sur base modale . . . . .	259
9.2.2. Exemple . . . . .	261
9.3. Couplage fluide structure. . . . .	265
9.3.1. Petits mouvements de fluides . . . . .	265
9.3.2. Notion de masse ajoutée. . . . .	266
9.3.3. Mode de ballonnement . . . . .	268
9.3.4. Couplage avec une structure . . . . .	271
<b>Chapitre 10. Réponse d'une structure non linéaire . . . . .</b>	<b>277</b>
10.1. Comportement non linéaire de structures . . . . .	277
10.1.1. Structures métalliques . . . . .	278
10.1.1.1. Rotule plastique. . . . .	278
10.1.1.2. Plastification par cisaillement. . . . .	279
10.1.1.3. Plastification en flexion et traction ou compression. . . . .	280
10.1.2. Structures en béton armé. . . . .	281
10.1.3. Flexion et extension en grands déplacements. . . . .	287
10.2. Système non linéaire à un degré de liberté. . . . .	291
10.2.1. Formulation. . . . .	291
10.2.2. Chargement impulsionnel . . . . .	292
10.2.3. Approche rigide plastique . . . . .	293

10.3. Cas d'un comportement élastoplastique . . . . .	294
10.3.1. Chargement impulsionnel . . . . .	294
10.3.2. Spectre de réponse non linéaire . . . . .	296
10.3.3. Système équivalent . . . . .	301
10.4. Approche de la réponse à un impact violent . . . . .	302
10.4.1. Choc sur une poutre . . . . .	302
10.4.2. Impact d'une charge répartie . . . . .	305
<b>Bibliographie</b> . . . . .	309
<b>Index</b> . . . . .	317



# Introduction

Dans des études de risques, les ingénieurs peuvent être amenés à devoir estimer les conséquences d'un accident entraînant un choc sur une construction. Cela peut concerner, par exemple, l'impact d'un véhicule ou d'un aéronef, ou, sur un site industriel, les effets d'une explosion.

Cet ouvrage réunit des éléments de mécanique appliquée dont découlent les méthodes pratiques, et parfois simplifiées, utilisées dans de telles études. Il s'adresse à des étudiants en master ou des élèves d'écoles d'ingénieurs ayant une formation assez générale en mécanique. Il peut également s'adresser à des ingénieurs en exercice souhaitant aborder le domaine de la résistance des structures aux actions mécaniques accidentelles. Il est un intermédiaire entre deux types d'ouvrages scientifiques : d'une part, il existe d'importantes ressources bibliographiques sur les domaines de la mécanique intervenant dans les études de choc sur des structures, c'est-à-dire les ondes dans les milieux continus, le comportement des matériaux, les calculs de résistance de structures, les vibrations, la dynamique des structures, etc. ; d'autre part, il existe des manuels techniques dédiés aux méthodes pratiques de calcul et de dimensionnement de structures devant résister à des chocs ou des explosions. Ces manuels peuvent être techniquement très précis, notamment sur des dispositions constructives. Tout comme les règlements relatifs au calcul de structures en béton armé ou en métal, leur utilisation pertinente suppose une connaissance des éléments théoriques de mécanique qui ont conduit aux méthodes qu'ils préconisent. Il est également nécessaire d'avoir une connaissance de base des phénomènes physiques mis en jeu dans les événements accidentels envisagés. Par exemple, concernant les effets des explosions sur une construction, l'ingénieur chargé du calcul de structure devra être à même de comprendre les paramètres physiques intervenant dans le processus explosif, leur lien avec l'effet externe de l'explosion qu'est l'onde de souffle, et la manière dont l'interaction avec une construction conduit à un chargement dynamique sur cette dernière. La démarche proposée par le

présent ouvrage est donc de partir des éléments de mécanique assez généraux et théoriques pour développer leurs applications aux cas des chocs et des impacts. Au fur et à mesure des développements apparaissent les hypothèses et limites des modélisations utilisées. Les méthodes de l'ingénieur abordées dans ces pages ne reposent pas sur un emploi d'importants codes numériques de calculs de structures.

L'impact sur une construction est d'abord un phénomène local qui provoque des contraintes et des déformations se propageant sous forme d'ondes dans le matériau. Le mouvement provoqué s'étend ensuite à l'ensemble de la structure. Ces deux phases de la réponse mécanique, locale puis globale, ont des temps caractéristiques différents. Dans son plan, cet ouvrage reprend cette chronologie. Une première partie est consacrée à l'étude de la dynamique des solides où entrent en jeu les phénomènes locaux. Une seconde partie est consacrée à la dynamique des structures où il s'agit de la réponse à un impact abordée à l'échelle globale d'une construction.

Dans la première partie, la propagation des mouvements dans un milieu continu est d'abord présentée dans le cadre des comportements linéaires que sont l'élasticité et la viscoélasticité. Les chocs de solides induisent des ondes de contraintes dont l'amplitude est liée à la vitesse d'impact. Ces ondes se propagent, se diffractent et se réfléchissent dans les solides. Les vitesses d'impact, lors d'évènements accidentels, sont suffisantes pour que le niveau de contrainte dépasse les limites d'élasticité des matériaux de construction. Il est alors nécessaire de comprendre comment les aspects non linéaires du comportement influent sur la propagation des contraintes et des déformations. Une caractéristique des chocs est de provoquer des niveaux de pression très supérieurs à ceux communément rencontrés dans les matériaux dans des conditions de chargements statiques. L'étude des comportements, dans ce cas, est assez spécifique au domaine des chocs.

Dans la seconde partie, le cas d'une structure simple, modélisée par un système mécanique à un degré de liberté, sert à introduire les outils de l'ingénieur que sont les spectres de choc et les courbes iso dommages. Il est ensuite introduit le cas de deux types de chargements dynamiques de courte durée : les collisions et les explosions. Les cas de collisions de structures, ou *crash*, sont abordés dans l'objectif de préciser le chargement imposé à la structure qui en subit les effets. Le cas des explosions est abordé avec la définition des connaissances de base, en énergétiques, nécessaires à la compréhension du phénomène. Le but est ici d'aboutir aux éléments caractéristiques du chargement dynamique qui peut être imposé à une structure. L'élément de base des constructions est le plus souvent une poutre. Aussi, une étude de l'évolution des contraintes et des mouvements dans les poutres lors d'impacts est exposée, afin de cerner les différents niveaux de modélisation possibles et leurs domaines de pertinence. Des structures de bâtiments ou d'édifices industriels peuvent

être modélisées, pour en étudier la réponse globale, par des systèmes mécaniques à plusieurs degrés de liberté, comme il est habituel de le faire pour les études parasismiques. La phase du comportement non linéaire des structures peut être atteinte. Dans les structures métalliques ou en béton armé, c'est le plus souvent par la formation de rotules plastiques que ces non-linéarités se manifestent. La réponse à un choc d'une structure comportant des rotules plastiques est envisagée.

D'une taille volontairement compacte, cet ouvrage couvre différents aspects significatifs et représentatifs des problèmes d'études de chocs sur les constructions. Tous les types de matériaux et de structures ne sont pas présentés, par exemple les matériaux composites, les plaques, les coques, etc. Enfin, il faut signaler que c'est une démarche pédagogique qui a guidé l'organisation de ce livre.





Dans les études de risques, les ingénieurs sont amenés à estimer les conséquences d'un accident entraînant un choc sur une construction. Cela peut concerner l'impact d'un véhicule terrestre ou d'un aéronef, ou les effets d'une explosion sur un site industriel.

Cet ouvrage présente une démarche didactique qui part des éléments théoriques de mécanique des matériaux et des structures pour développer leurs applications aux cas des chocs et les impacts. Ces derniers sont d'abord étudiés à une échelle locale. Ils induisent des contraintes et des déformations se propageant sous forme d'ondes dans le matériau, le mouvement provoqué s'étend ensuite à l'ensemble de la structure.

Une première partie est consacrée à l'étude de la dynamique des solides où entrent en jeu les comportements non linéaires. Une seconde partie est consacrée à la dynamique des structures et à l'évaluation de la réponse transitoire abordée à l'échelle globale d'une construction. Des méthodes pratiques, simplifiées et couramment utilisées par les ingénieurs sont également proposées tout au long de cet ouvrage.

### *L'auteur*

Professeur à l'École nationale supérieure d'ingénieurs de Bourges, Patrice Bailly est responsable de l'axe thématique Dynamique des matériaux et des structures du laboratoire PRISME.