

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## ONDES ET MATIÈRE

# Ondes de choc et détonations

De la théorie aux applications

Cours, exercices et problèmes corrigés

Pascal Bauer

Ashwin Chinnayya

Thibaut de Ressaéguier

ellipses

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

---

## ONDES ET MATIÈRE

# Ondes de choc et détonations

De la théorie aux applications

Cours, exercices et problèmes corrigés

Pascal BAUER

Professeur des universités  
ENSMA Poitiers

Ashwin CHINNAYYA

Professeur des universités  
ENSMA Poitiers

Thibaut de RESSÉGUIER

Directeur de recherche  
ENSMA Poitiers



**Du même auteur et avec le même auteur, dans la même collection :**

- *Propulseurs aéronautiques et spatiaux* (C) 288 p. P. BAUER
- *La thermodynamique, des principes aux applications* (B) 312 p. C. CHEZE, P. BAUER

**Dans la même collection**

- *Écoulements et transferts* (C) 312 p. R. BRUN, N. BELOUAGGADIA
- *Aérodynamique* (C) 240 p. F. RICHECOEUR
- *Phénomènes de transfert. Transferts diffusifs, convectifs, ondulatoires* (C) 240 p. A. LALLEMAND
- *La méthode modale en thermique* (C) 320 p. G. LEFEBVRE
- *Combustion. Inflammation, combustion, pollution, applications* (C) 320 p. P. ARQUES

Les figures, schémas et courbes de la partie C de cet ouvrage  
ont été réalisés par Pascal Delaunay.

ISBN 9782340-005563

©Ellipses Édition Marketing S.A., 2015

32, rue Bargaue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), 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 » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

[www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)

*A la mémoire de Numa Manson,  
Professeur à l'Université de Poitiers,  
Fondateur du "Laboratoire d'Energétique et  
de Détonique" de l'E.N.S.M.A.*

*Un des pionniers dans l'enseignement de la  
détonique ...*

*Ils étaient les premiers<sup>1</sup> ...*



D. Chapman

E. Jouguet

Ya. B. Zel'dovich

J. Von Neumann

W. Döring



E.-F. Mallard



H. Le Chatelier



P.-H. Hugoniot



W. Rankine

"L'union de la Mécanique rationnelle et de la Thermodynamique se présente comme un premier stade, caractérisé par une doctrine bien homogène, de nature nettement macroscopique et de méthode assez uniforme, la Thermodynamique pouvant être présentée, grâce à la notion de potentiel interne, comme un épanouissement du principe des vitesses virtuelles"

Emile Jouguet

<sup>1</sup> Photos publiques extraites notamment de : P. Bauer, E.K. Dabora, and N. Manson, "*Chronology of Early Research on Detonation Wave*", *Progress in Aeronautics and Astronautics*, Ed. AIAA, New York, Vol. 133, (1991), pp. 73-88.

## PREFACE

Les ondes de chocs et les détonations ont été découvertes au XIX<sup>ème</sup> siècle par des ingénieurs et des scientifiques de grand talent, doués d'une ingéniosité remarquable et motivés par le développement des explosifs ou la sécurité dans les mines de charbon. Parmi ceux-ci il convient de citer Abel, Berthelot, Vieille, Mallard et Le Chatelier. Des contributions plus théoriques ont aussi été apportées très tôt par des grands noms de la science, comme Poisson, Stokes, Riemann, Lord Rayleigh, Taylor etc..., pour n'en citer que quelques uns. Après bien des errements, la profonde compréhension de ces ondes ne s'est cependant développée que plus tard, dans la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, à la suite des travaux de Zeldovich. Plus surprenant encore, les mécanismes d'instabilités des détonations n'ont commencé à être compris qu'au cours des quinze dernières années et bien du chemin reste à faire dans cette direction.

De nombreux aspects restent totalement incompris, d'autres méritent d'être approfondis pour dire le moins. C'est notamment le cas de la formation des lignes de points triples aussi bien sur les chocs se propageant dans un écoulement turbulent que sur le choc de tête des détonations cellulaires dans les gaz. De même l'initiation des détonations gazeuses est un problème scientifique toujours largement ouvert. Dans ce contexte, parmi les nombreuses questions à éclaircir il faut mentionner la transition déflagration-détonation, le lien entre la taille des structures cellulaires et l'énergie d'amorçage direct qui ne fait l'objet que de corrélations empiriques, la propagation en spirale observée depuis fort longtemps en laboratoire au voisinage des limites de propagation et tout récemment dans des expériences à grande échelle dans des galeries de mines aux USA. Il en va de même pour l'allumage dit spontané des détonations, mécanisme découvert il y a une quarantaine d'années, et qui a été mis en cause dans des catastrophes récentes, etc... Tous ces problèmes scientifiques sont d'une importance capitale dans de nombreux domaines appliqués, notamment pour la sécurité des complexes industriels, centrales nucléaires incluses, mais aussi pour la propulsion en aérospatial et aéronautique.

Il y a un autre exemple totalement incompris dans un tout autre domaine, l'astrophysique. C'est la formation d'une onde de choc lors de l'effondrement gravitationnel d'une étoile en fin de vie, observée depuis une cinquantaine d'années dans les simulations numériques. Les conditions de sa propagation vers l'extérieur pour conduire à une formidable explosion sous forme d'une supernova du type II, phénomène responsable de la formation et de la dissémination de nombreux constituants de l'univers, restent mystérieuses...

Malgré l'importance de ces sujets les ouvrages d'enseignement qui leur sont consacrés sont rares, plus particulièrement ceux en langue française. Le présent livre remédie à cet état de choses. Écrit par des enseignants de l'ISAE-ENSMA de Poitiers, il est destiné à des élèves ingénieurs. L'environnement scientifique de cette école fait de Poitiers un des meilleurs centres académiques pour enseigner ces sujets qui sont depuis longtemps au cœur même de la recherche dans les laboratoires environnants, réputés internationalement pour leurs résultats théoriques et expérimentaux dans ces domaines.

L'ordre de présentation des sujets est judicieux: en première partie les ondes de choc dans les gaz, suivie des ondes de choc dans les solides, et en troisième partie les détonations. Le panorama fourni est riche de ces violents phénomènes compressibles trop souvent oubliés dans l'enseignement en mécanique. L'accent est mis sur les aspects pratiques, comme il convient à des élèves ingénieurs, sans pour autant négliger les aspects fondamentaux en les dégageant autant que possible des développements qui impliqueraient un niveau qui dépasse le cadre de ce livre.

Je souhaite le meilleur accueil à cet ouvrage qui sera très bénéfique aux élèves ingénieurs en attirant leur attention sur des sujets scientifiques d'importance dans plusieurs domaines clés du développement industriel et trop souvent ignorés.

Paul CLAVIN  
Professeur émérite à Aix-Marseille Université,  
Institut de Recherche sur les Phénomènes Irréversibles,  
Chaire de mécanique physique à l'Institut  
Universitaire de France (1993-2004)

# SOMMAIRE

## **PARTIE A - ONDES DE CHOC DANS LES GAZ**

DE LA CINÉTIQUE CHIMIQUE A LA DÉTONATION	14
Chapitre I – LA PROPAGATION DES ONDES	15
1. CLASSIFICATION	15
1.1 Amplitude faible	
1.2 Amplitude de dimension finie	
1.3 Grande amplitude	
2. EQUATION DE PROPAGATION D'UNE ONDE	15
2.1 Ecoulement continu	
2.2 Ecoulement présentant une discontinuité	
2.3 L'onde sonore	
2.4 Equations générales	
3. ONDE SIMPLE DE RIEMANN	19
Chapitre II – LES ONDES DE CHOC	24
1. INTRODUCTION	24
2. LES EQUATIONS DE CONSERVATION	24
2.1 Célérité de l'onde et représentation graphique	
2.2 Adiabatique de Hugoniot	
2.3 Adiabatiques dynamique et statique	
2.4 Cas du gaz parfait	
Chapitre III – REFLEXION DES ONDES DE CHOC APPLICATION AU TUBE À CHOC	34
1. LE TUBE A CHOC	34
2. CALCUL DU CHOC INCIDENT	35
3. CALCUL DU CHOC REFLECHI SUR UN OBSTACLE FIXE	37
3.1 Description du phénomène	
3.2 Mise en équations	
Chapitre IV – LIBÉRATION D'ENERGIE DANS UNE CONDUITE DE SECTION CONSTANTE	42
1. INTRODUCTION	42
2. EQUATIONS GENERALES ET RESOLUTION	42
3. REPRESENTATION GRAPHIQUE ET SIGNIFICATION PHYSIQUE	44
Chapitre V – PROBLEMES DE SYNTHÈSE	47
1. ONDES DE CHOC	47
2. TUBE A CHOC	49

## **PARTIE B - ONDES DE CHOC DANS LES SOLIDES**

PROBLEMATIQUE DES MILIEUX DENSES	55
Chapitre VI – OUTILS ANALYTIQUES DE BASE	57
1. EQUATIONS CARACTERISTIQUES	57
1.1 Conservation de la masse	
1.2 Conservation de la quantité de mouvement	
1.3 Conservation de l'énergie	
1.4 Equation d'état	
2. COURBES CARACTERISTIQUES	60
2.1 Courbe d'Hugoniot	
2.2 Polaire de choc	
3. RELATIONS SUPPLEMENTAIRES	62
3.1 Relation d'état	
3.2 Relation cinétique	
Chapitre VII – QUELQUES CAS PRATIQUES	67
1. TRANSMISSION ET REFLEXION DE CHOCS PLANS	67
1.1 Equilibre hydrodynamique	
1.2 Transmission / réflexion au passage d'une interface	
1.3 Réflexion d'un choc sur une surface libre	
2. APPLICATION : ANALYSE D'UN IMPACT PLAN	69
2.1 Cas $Z_P > Z_C$	
2.2 Cas $Z_P < Z_C$	
3. CHOC PRODUIT PAR DETONATION	73
Chapitre VIII – QUELQUES SPÉCIFICITÉS DES SOLIDES	75
1. TRACTION DYNAMIQUE ET ECAILLAGE	75
1.1 Description phénoménologique de l'écaillage	
1.2 Résistance à la rupture dynamique	
2. STABILITE / INSTABILITE D'UN FRONT DE CHOC	80
3. COMPORTEMENT ELASTO-PLASTIQUE	81
3.1 Elasticité en déformation uniaxiale	
3.2 Comportement élasto-plastique parfait	
3.3 Effet sur la propagation des chocs	
3.4 Effet sur la propagation des détentes	
3.5 Limite élastique d'Hugoniot	
4. TRANSFORMATIONS DE PHASE	86
4.1 Thermodynamique des changements de phase	
4.2 Transformations de phase sous choc	
4.3 Cinétique des transformations de phase	

5. COMPACTION DE MATERIAUX POREUX	92
5.1 Modèle P- $\alpha$	
5.2 Effets de la compaction sur la propagation des chocs	
5.3 Effets de la compaction sur les détente	
5.4 Effets de la compaction sur l'amortissement	
5.5 Effets de la compaction sur la température	
Chapitre IX – CALCUL DES TEMPÉRATURES	98
1. TEMPERATURE POST-CHOC	98
2. TEMPERATURE POST-DETENTE	100
Chapitre X –PROBLEMES DE SYNTHÈSE	103
1. DETERMINATION D'UNE COURBE D'HUGONIOT	103
2. DETERMINATION D'UNE POLAIRE DE CHOC	107
3. ELASTICITE, ECAILLAGE	109
4. AMORTISSEMENT HYDRODYNAMIQUE	112
<b><u>PARTIE C – LA DETONATION</u></b>	
APPLICATION AUX PHENOMÈNES FORTEMENT EXOTHERMIQUES	117
Chapitre XI – ONDES DE CHOC ET DE COMBUSTION : LA DÉTONATION	118
1. PROBLEMATIQUE	118
2. RÉOLUTION DES ÉQUATIONS	118
2.1 Forme générale	
2.2 Courbe de Crussard	
2.3 Sens d'écoulement des gaz brûlés	
2.4 Distribution de l'entropie le long de la courbe de Crussard	
2.5 Comparaison entre vitesse des gaz brûlés en aval d'une onde de détonation et célérité du son	
3. ETUDE DU POINT CHAPMAN-JOUGUET	128
3.1 Solution approchée	
3.2 Solution exacte	
3.3 Détonations fortes	
4. LES METHODES EMPIRIQUES DE CALCUL DES PROPRIETES DE DETONATION	134
4.1 Méthodes de calcul	
4.2 Exemple de calcul : thermochimie appliquée au calcul des propriétés de détonation d'un explosif condensé	
Chapitre XII – LE MODÈLE ZEL'DOVICH – NEUMANN – DÖRING (ZND) DE LA DÉTONATION	139
1. MÉCANISME PHYSIQUE ET ÉQUATIONS	139

2. EXEMPLE DE MECANISME REACTIONNEL DANS LE CAS D'UN SYSTEME À BASE DE MÉTHANE	144
2.1 Un modèle à une réaction globale	
2.2 Un modèle à deux réactions	
2.3 Un modèle à cinq réactions	
3. DESCRIPTION DE LA ZONE DE REACTION	146
3.1 Etat ZND	
3.2 De l'état ZND à CJ	
Chapitre XIII – STRUCTURE DE L'ONDE DE DÉTONATION	152
1. MECANISME DE FORMATION DES CELLULES	152
2. CONFIGURATION ET ORGANISATION DES CELLULES	155
2.1 Configuration tridimensionnelle	
2.2 Visualisation et régularité des cellules	
3. LIEN AVEC LE MÉCANISME CHIMIQUE DU PHÉNOMÈNE	161
4. FACTEURS AGISSANT SUR LA TAILLE DE LA CELLULE ET CONSÉQUENCES	162
4.1 Influence de la pression initiale du mélange et de la dilution en inerte	
4.2 Influence de la richesse du mélange	
4.3 Influence de la température initiale du mélange et de la force de la détonation	
5. CONDITIONS DE PROPAGATION CONDUISANT À DES STRUCTURES PARTICULIÈRES	167
5.1 Existence de sous structures	
5.2 Détonations à double structure	
5.3 Détonation hélicoïdale	
Chapitre XIV – SUR LA DÉTONABILITÉ DES MÉLANGES RÉACTIFS	171
1. AMORÇAGE OU EXTINCTION	171
2. ENERGIE CRITIQUE D'INITIATION	171
2.1 Définition des paramètres gouvernants	
2.2 Analyse dimensionnelle	
2.3 Similitude des effets	
3. LES DIFFÉRENTS MODES D'AMORÇAGE DE LA DÉTONATION	174
3.1 Amorçage direct	
3.2 Amorçage par transition déflagration – détonation (TDD)	
4. DIFFRACTION DE LA DÉTONATION CJ D'UN TUBE VERS L'ESPACE LIBRE	178
5. DIAMÈTRE CRITIQUE DE PROPAGATION D'UNE DÉTONATION	180
6. AMORÇAGE PAR TRANSMISSION D'UNE DÉTONATION	185
6.1 Description du mécanisme	
6.2 Résolution des équations	
7. DIAGRAMME DES LIMITES DE DÉTONABILITÉ	190

Chapitre XV –HYDRODYNAMIQUE DES PRODUITS DE DÉTONATION	192
1. NOTIONS PRÉALABLES SUR LA DÉTENTE DES PRODUITS DE DÉTONATION	192
1.1 Retour sur l’invariant de Riemann	
1.2 Trajectoires et caractéristiques des ondes : cas général	
1.3 Application au phénomène de détente	
2. LA DÉTENTE DES PRODUITS DE DÉTONATION	199
Chapitre XVI –PROBLÈMES DE SYNTHÈSE	204
1. ACCELERATEUR A EFFET STATO – CARACTERISTIQUES CJ	204
2. MELANGE BINAIRE – CARACTERISTIQUES CJ	206
3. ACCELERATEUR A EFFET STATO – CARACTERISTIQUES ZND	208
4. MELANGE BINAIRE – CARACTERISTIQUES ZND	211
5. CARACTERISTIQUES DE DETONATION DU RDX	211
6. CARACTERISTIQUES DE DETONATION DE LA PENTRITE	213
<b><u>PARTIE D – METHODES NUMERIQUES</u></b>	
LES OUTILS DE SIMULATION	217
Chapitre XVII – CODES THERMOCHIMIQUES	218
1. OBJECTIFS	218
2. CODES DE CALCUL DES PROPRIÉTÉS DE DÉTONATION	218
2.1 Les différents domaines considérés	
2.2 Equations d’état et codes associés	
2.2.1 Des basses pressions aux pressions modérées	
2.2.2 Les hautes et très hautes pressions associées aux mélanges et systèmes explosifs gazeux	
2.2.3 Les très hautes pressions associées aux explosifs condensés	
Chapitre XVIII – CODES DE DYNAMIQUE RAPIDE	231
1. DISCRETISATION SPATIALE	231
1.1 Méthode Lagrangienne	
1.2 Méthode Eulérienne	
1.3 Méthode Arbitraire-Lagrange-Euler	
1.4 Méthodes sans maillage	
2. INTEGRATION TEMPORELLE	234
3. DESCRIPTION DES MATERIAUX SOLIDES	235
4. TRAITEMENT DES ONDES DE CHOC	236

Chapitre XIX– EXEMPLES DE SIMULATIONS DE CAS PRATIQUES	237
1. COMPRESSION DYNAMIQUE PAR DETONATION	237
1.1 Description de l'expérience	
1.2 Approche analytique	
1.3 Simulation numérique	
2. IMPACT DE FEUILLE PROPULSEE PAR PLASMA	244
3. TRANSITION DU CHOC A LA DETONATION DANS LES EXPLOSIFS LIQUIDES	248
 <u>BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE</u>	 252
 <u>INDEX</u>	 254

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

---

## ONDES ET MATIÈRE

# Ondes de choc et détonations

De la théorie aux applications

Cours, exercices et problèmes corrigés

Pascal BAUER

Professeur des universités  
ENSMA Poitiers

Ashwin CHINNAYYA

Professeur des universités  
ENSMA Poitiers

Thibaut de RESSÉGUIER

Directeur de recherche  
ENSMA Poitiers



**Du même auteur et avec le même auteur, dans la même collection :**

- *Propulseurs aéronautiques et spatiaux* (C) 288 p. P. BAUER
- *La thermodynamique, des principes aux applications* (B) 312 p. C. CHEZE, P. BAUER

**Dans la même collection**

- *Écoulements et transferts* (C) 312 p. R. BRUN, N. BELOUAGGADIA
- *Aérodynamique* (C) 240 p. F. RICHECOEUR
- *Phénomènes de transfert. Transferts diffusifs, convectifs, ondulatoires* (C) 240 p. A. LALLEMAND
- *La méthode modale en thermique* (C) 320 p. G. LEFEBVRE
- *Combustion. Inflammation, combustion, pollution, applications* (C) 320 p. P. ARQUES

Les figures, schémas et courbes de la partie C de cet ouvrage  
ont été réalisés par Pascal Delaunay.

ISBN 9782340-005563

©Ellipses Édition Marketing S.A., 2015

32, rue Bargaue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), 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 » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

[www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)

*A la mémoire de Numa Manson,  
Professeur à l'Université de Poitiers,  
Fondateur du "Laboratoire d'Energétique et  
de Détonique" de l'E.N.S.M.A.*

*Un des pionniers dans l'enseignement de la  
détonique ...*

*Ils étaient les premiers<sup>1</sup> ...*



D. Chapman

E. Jouguet

Ya. B. Zel'dovich

J. Von Neumann

W. Döring



E.-F. Mallard



H. Le Chatelier



P.-H. Hugoniot



W. Rankine

"L'union de la Mécanique rationnelle et de la Thermodynamique se présente comme un premier stade, caractérisé par une doctrine bien homogène, de nature nettement macroscopique et de méthode assez uniforme, la Thermodynamique pouvant être présentée, grâce à la notion de potentiel interne, comme un épanouissement du principe des vitesses virtuelles"

Emile Jouguet

<sup>1</sup> Photos publiques extraites notamment de : P. Bauer, E.K. Dabora, and N. Manson, "*Chronology of Early Research on Detonation Wave*", *Progress in Aeronautics and Astronautics*, Ed. AIAA, New York, Vol. 133, (1991), pp. 73-88.