

# 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 Rességuier



La côte de l'ouvrage : 2-532-101

# SOMMAIRE

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

DE LA CINÉTIQUE CHIMIQUE À 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 Écoulement continu	
2.2 Écoulement 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 À 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'ÉNERGIE DANS UNE CONDUITE DE SECTION CONSTANTE	42
1. INTRODUCTION	42
2. EQUATIONS GÉNÉRALES ET RÉSOLUTION	42
3. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ET SIGNIFICATION PHYSIQUE	44
Chapitre V – PROBLÈMES DE SYNTHÈSE	47
1. ONDES DE CHOC	47
2. TUBE À 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 détentes	
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