

---

# Écoulements multiphasiques

*des fondements aux méthodes d'ingénierie*

Benoît Oesterlé

 **hermes**

*Lavoisier*

---

## Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	13
<b>Principales notations</b> . . . . .	15
<b>Chapitre 1. Principes généraux et notions de base</b> . . . . .	21
1.1. Différents types d'écoulements, limitations . . . . .	22
1.1.1. Tentative de classification . . . . .	22
1.1.2. Applications industrielles et autres . . . . .	24
1.1.2.1. Applications en écoulements dispersés . . . . .	24
1.1.2.2. Applications en écoulements à interfaces évolutives . . . . .	25
1.1.3. Limitations de cet ouvrage . . . . .	25
1.2. Cadre théorique . . . . .	26
1.2.1. Equations ponctuelles instantanées et conditions de saut . . . . .	26
1.2.2. Distribution caractéristique de phase, opérateurs de moyenne . . . . .	28
1.2.3. Equations générales moyennées . . . . .	29
1.2.3.1. Conservation de la masse de la phase n° $K$ . . . . .	30
1.2.3.2. Conservation de la quantité de mouvement de la phase n° $K$ . . . . .	30
1.2.3.3. Conservation de l'énergie totale de la phase n° $K$ . . . . .	31
1.2.4. Mise en œuvre, principes des méthodes eulériennes . . . . .	32
1.3. Particularités des écoulements à phase dispersée . . . . .	33
1.3.1. Simplification des termes de transferts interfaciaux . . . . .	33
1.3.2. Termes collisionnels . . . . .	34
1.3.3. Description statistique du mouvement de la phase dispersée . . . . .	34
1.3.4. Approche lagrangienne . . . . .	35
1.3.5. Couplage entre phases . . . . .	36
1.3.6. Caractérisation d'une phase dispersée . . . . .	36
1.3.6.1. Ecoulements dilués ou denses . . . . .	36
1.3.6.2. Granulométrie . . . . .	37

6.3.1.2. Vitesse minimale de transport	222
6.3.1.3. Conduite verticale	222
6.3.2. Estimation des pertes de charge	222
6.3.2.1. Très fines particules, influence de la pesanteur négligeable	222
6.3.2.2. Particules de grande inertie, influence de la pesanteur non négligeable	222
<b>Chapitre 7. Traitement des écoulements diphasiques dispersés</b>	222
7.1. Equations générales moyennées de la phase continue	222
7.1.1. Equations de continuité et du mouvement	222
7.1.2. Equations de la turbulence et termes de couplage diphasique	222
7.1.3. Conditions à la paroi pour la phase continue	222
7.2. Approche eulérienne-eulérienne	222
7.2.1. Equations générales moyennées de la phase dispersée	222
7.2.2. Méthodes de fermeture	222
7.2.2.1. Vitesse de dérive	222
7.2.2.2. Covariances fluide-particules	222
7.2.2.3. Contraintes cinétiques ou tensions de Reynolds de la phase dispersée	222
7.2.3. Modélisation statistique ou approche PDF	222
7.2.3.1. Equation de transport de la PDF	222
7.2.3.2. Equations aux moments de la phase dispersée	222
7.2.3.3. Inclusion de la vitesse du fluide vu dans l'espace des phases	222
7.2.3.4. Termes collisionnels	222
7.2.4. Conditions à la paroi pour la phase dispersée	222
7.2.5. Simulation des grandes échelles en écoulement diphasique dispersé	222
7.3. Méthodes eulériennes-lagrangiennes	222
7.3.1. Calcul des trajectoires de particules	222
7.3.2. Suivi lagrangien en champ turbulent prédit par DNS ou LES	222
7.3.3. Suivi lagrangien en écoulement turbulent prédit par modèle RANS	222
7.3.4. Prise en compte des interactions entre particules	222
7.3.4.1. Algorithmes de détection de collisions	222
7.3.4.2. Méthode probabiliste à une particule fictive	222
7.3.4.3. Méthodes de Monte-Carlo	222

## Chapitre 8. Traitement des écoulements à interfaces évolutives : gaz-liquide, liquide-liquide

8.1. Méthodes de capture ou suivi d'interface	
8.1.1. Principes et mise en œuvre des modèles VOF ( <i>Volume of Fluid</i> )	
8.1.2. Reconstruction des interfaces	
8.1.3. Les méthodes <i>Level-Set</i>	
8.1.4. Les méthodes <i>Front-Tracking</i>	
8.1.5. Méthode <i>Lattice Boltzmann</i>	

8.1.6. Conditions à la paroi	279
8.2. Écoulements à bulles	280
8.2.1. Propriétés des écoulements à bulles confinés	280
8.2.2. Écoulements à microbulles	281
8.2.3. Modèles à deux fluides ou multifluides	282
8.2.3.1. Formulation des modèles à deux fluides	283
8.2.3.2. Modélisation de la turbulence	285
8.2.4. Écoulements à bulles polydispersées : modèles multifluides	287
8.3. Écoulements avec coalescence et/ou fragmentation	287
8.3.1. Bilans de population	287
8.3.1.1. Méthode des classes	288
8.3.1.2. Méthode des moments	289
8.3.2. Modèles hybrides à $N + 2$ phases	291
8.3.3. Aire interfaciale volumique	291
<b>Chapitre 9. Écoulements à interfaces évolutives : liquide-liquide</b>	295
9.1. Écoulements à interfaces évolutives	315

1.1 Problèmes liés aux écoulements à phases séparées . . . . . 19

1.1.1 Interfaces et forces interfaciales . . . . . 39

1.1.1.1 Tension de surface . . . . . 39

1.1.1.2 Contact avec un solide, mouillage . . . . . 40

1.4.2. Notions sur les instabilités interfaciales . . . . . 41

1.4.2.1 Instabilité de Rayleigh . . . . . 41

1.4.2.2 Instabilité de Kelvin-Helmholtz . . . . . 42

1.4.2.3 Instabilité de Rayleigh-Taylor . . . . . 43

1.4.2.4 Instabilité de Saffman-Taylor . . . . . 44

1.4.3. Approches adaptées à ce type d'écoulements . . . . . 44

1.5. Les paramètres adimensionnels en écoulements multiphasiques . . . . . 44

1.5.1. En l'absence d'effets dus aux forces interfaciales . . . . . 44

1.5.2. En présence de forces interfaciales . . . . . 46

**PREMIÈRE PARTIE. MÉCANISMES ÉLÉMENTAIRES . . . . . 49**

**Chapitre 2. Actions hydrodynamiques sur les particules en écoulement dispersé . . . . . 51**

2.1. Actions hydrodynamiques en écoulement uniforme stationnaire . . . . . 52

2.1.1. Force de traînée sur une particule solide sphérique . . . . . 52

2.1.1.1. Fluide incompressible . . . . . 53

2.1.1.2. Effets de raréfaction et de compressibilité . . . . . 54

2.1.2. Force de traînée sur les particules sphériques fluides . . . . . 56

2.1.2.1. Gouttelettes dans un gaz en l'absence d'évaporation . . . . . 56

2.1.2.2. Gouttelettes en cours de vaporisation . . . . . 57

2.1.2.3. Bulles (et gouttes dans un liquide) . . . . . 58

2.1.3. Temps de relaxation : une notion fondamentale . . . . . 60

2.1.4. Vitesse limite de chute ou ascensionnelle d'une particule sphérique . . . . . 62

2.1.5. Force et couple sur une particule solide en rotation . . . . . 64

2.1.5.1. Sphère en rotation dans un fluide au repos à l'infini . . . . . 64

2.1.5.2. Sphère en translation et rotation . . . . . 65

2.1.6. Particules solides non sphériques . . . . . 67

2.1.7. Particules non isolées : influence de la concentration . . . . . 69

2.1.7.1. Faible et moyenne concentration en particules . . . . . 70

2.1.7.2. Forte concentration en particules . . . . . 70

2.2. Particules sphériques en écoulement non uniforme stationnaire . . . . . 72

2.2.1. Résultats théoriques et numériques en fluide illimité . . . . . 72

2.2.1.1. Très petits nombres de Reynolds, formules de Faxen . . . . . 73

2.2.1.2. Influence des forces d'inertie . . . . . 75

2.2.1.3. Portance sur les bulles et gouttes en écoulement cisailé . . . . . 76

2.2.2. Particules au voisinage d'une paroi . . . . . 77

2.2.2.1. Particule sphérique rigide, fluide au repos à l'infini . . . . . 77

2.2.2.2. Particule sphérique rigide dans un fluide en écoulement . . . . . 78

2.2.2.3. Bulles et gouttelettes au voisinage d'une paroi . . . . . 81

2.2.3. Influence des forces transversales en écoulements diphasiques dispersés . . . . . 82

2.2.3.1. Écoulement de suspension de particules solides . . . . . 82

2.2.3.2. Écoulement à bulles . . . . . 84

**2.3 Effets instationnaires . . . . . 84**

2.3.1. Cas des très petits nombres de Reynolds . . . . . 84

2.3.2. Extensions aux nombres de Reynolds plus élevés . . . . . 86

2.3.3. Exemple de calcul : trajectoire d'une bulle . . . . . 88

**Chapitre 3. Gouttes et bulles . . . . . 91**

3.1. Problèmes de forme et vitesse terminale . . . . . 91

3.1.1. Vitesse terminale des particules déformables . . . . . 92

3.1.2. Caractérisation de la forme de particules fluides en mouvement dans un liquide . . . . . 96

3.2. Formation et évolution des bulles . . . . . 100

3.2.1. Formation par injection de gaz dans un liquide . . . . . 100

3.2.2. Croissance et décroissance des bulles . . . . . 102

3.2.3. Évolution des bulles en écoulement en conduite . . . . . 103

3.3. Fragmentation et coalescence . . . . . 104

3.3.1. Coalescence . . . . . 105

3.3.2. Fragmentation de gouttes . . . . . 105

3.3.2.1. Déformation et fragmentation . . . . . 105

3.3.2.2. Caractéristiques des gouttelettes formées . . . . . 107

3.3.2.3. Modèles de fragmentation de gouttes . . . . . 108

3.3.3. Fragmentation de bulles . . . . . 110

3.4. Atomisation de gouttelettes, sprays . . . . . 113

3.4.1. Fragmentation d'un jet liquide, atomisation primaire . . . . . 113

3.4.2. Atomisation secondaire . . . . . 116

3.5. Transferts de chaleur et de masse . . . . . 117

3.5.1. Nombre de Nusselt d'une particule sphérique . . . . . 117

3.5.2. Transfert de masse : évaporation d'une gouttelette . . . . . 118

3.5.3. Nombre de Sherwood d'une particule sphérique . . . . . 120

3.5.4. Exemple : pluie et brouillard . . . . . 122

3.5.5. Influence de la concentration, évaporation d'un nuage de gouttelettes . . . . . 123

**Chapitre 4. Interactions particules-turbulence . . . . . 125**

4.1. Diffusion turbulente de particules fluides . . . . . 125

4.1.1. Tenseur de dispersion et corrélations lagrangiennes . . . . . 125

4.1.2. Transport turbulent, diffusivité turbulente . . . . . 128

4.1.3. Trajectoires de particules fluides, modèles stochastiques lagrangiens . . . . . 130

4.1.3.1. Modèle de Langevin simple (SLM)	131
4.1.3.2. Coefficient de diffusion turbulente et échelle intégrale lagrangienne	132
4.1.3.3. Modèle de Langevin généralisé (GLM)	133
4.2. Dispersion turbulente de particules discrètes	135
4.2.1. Dispersion de particules inertielles en THI : les fondements	135
4.2.1.1. Mouvement d'une particule lourde dans un champ fluide fluctuant	136
4.2.1.2. La théorie de Tchen	138
4.2.1.3. Exemple d'application	140
4.2.2. La turbulence « vue » : effets d'inertie et de croisement de trajectoires	141
4.2.2.1. Effet d'inertie	141
4.2.2.2. Effet de croisement de trajectoires, ou <i>Crossing Trajectory Effect</i> (CTE)	144
4.3. Modèles de dispersion	146
4.3.1. Evaluation des échelles intégrales	148
4.3.2. Modèles d'interaction tourbillon-particule ( <i>Eddy Interaction Models</i> , ou <i>EIM</i> )	149
4.3.3. Modèles continus basés sur des processus de Markov	149
4.3.3.1. Modèles en deux étapes	150
4.3.3.2. Modèles de Langevin directs (ou en une seule étape)	152
4.4. Le phénomène de concentration préférentielle	155
4.5. Influence des particules sur la turbulence du fluide	155
4.5.1. Evidences expérimentales	156
4.5.1.1. Observations en turbulence homogène	157
4.5.1.2. Ecoulements turbulents dispersés en couche limite ou en conduite	159
4.5.2. Résultats théoriques et numériques, modélisation	159
4.5.2.1. Loi de paroi en écoulements à bulles	159
4.5.2.2. Modélisation de la modification de l'intensité turbulente en écoulement gaz-particules	159
4.5.2.3. Termes sources traduisant l'influence des particules sur la turbulence	160
<b>Chapitre 5. Interactions particule-paroi et particule-particule</b>	
5.1. Interactions particule-paroi	161
5.1.1. Interactions hydrodynamiques	161
5.1.2. Collisions entre particules solides et paroi	162
5.1.2.1. Collision « idéalisée » d'une particule sphérique homogène sur une paroi	162

5.1.2.3. Modèles à rebonds irréguliers	165
5.1.2.4. Mise en œuvre	167
5.1.3. Dépôt et adhérence	169
5.1.3.1. Dépôt turbulent	169
5.1.3.2. Forces d'adhésion	170
5.1.4. Interactions gouttelette-paroi	171
5.2. Interactions entre particules	172
5.2.1. Interactions hydrodynamiques	172
5.2.1.1. Résultats théoriques pour deux sphères dans un fluide au repos	172
5.2.1.2. Résultats expérimentaux à nombres de Reynolds plus élevés	174
5.2.2. Collisions entre particules	174
5.2.2.1. Fréquence de collision	174
5.2.2.2. Traitement d'une collision entre particules solides sphériques	178
5.2.2.3. Collisions entre gouttelettes ou bulles	180
5.2.2.4. Influence des collisions inter-particulaires en écoulements diphasiques dispersés	181
5.2.3. Agglomération et coalescence	182
5.2.3.1. Agglomération de particules solides	182
5.2.3.2. Coalescence de gouttelettes	182
5.2.3.3. Coalescence de bulles	186
<b>ANNEXE PARTIE. APPROCHES PRÉDICTIVES ET SIMULATIONS</b>	
5.3. Écoulements en conduite : méthodes d'ingénierie classique	191
5.3.1. Équations intégrales et modèles globaux élémentaires	191
5.3.1.1. Équations intégrales de conservation de la masse et de la quantité de mouvement	192
5.3.1.2. Principe des modèles globaux élémentaires	194
5.3.2. Écoulements gaz-liquide en conduite	194
5.3.2.1. Régimes d'écoulement, cartes	197
5.3.2.1.1. Écoulement horizontal	198
5.3.2.1.2. Écoulement vertical	203
5.3.2.2. Calcul pratique du gradient de pression	206
5.3.2.3. Écoulements dispersés homogènes	207
5.3.2.3.1. Modèle à phases séparées de Lockhart-Martinelli	207
5.3.2.3.2. Écoulements avec changement de phase	212
5.3.2.3.3. Écoulements avec changement de phase	214
5.3.2.4. Modèle homogène corrigé de Storek-Brauer	216
5.3.2.5. Corrélation de Garcia en écoulement horizontal	217
5.3.3. Exemple	218
5.3.4. Cas particulier des écoulements en microcanaux	218
5.3.5. Écoulement gaz-solide en conduite	219
5.3.6. Écoulement cas du transport pneumatique	221