



*Traité de Génie des Procédés*

# Phénomènes de transfert en génie des procédés

Jean-Pierre Couderc  
Christophe Gourdon  
Alain Liné

Editions  
**TEC**  
& **DOC**

*Lavoisier*

# Table des matières

Avant-propos .....	III
--------------------	-----

## *Première partie*

### **Présentation des concepts et des lois**

#### *Thème 1*

#### *Analyse globale*

#### *Chapitre 1*

### **Un premier contact avec les phénomènes de transfert...**

1. Atomes, molécules et description continue de la matière .....	7
2. Les états de la matière .....	8
3. Compressibilité et dilatabilité .....	8
4. Vitesse – Gradient de vitesse .....	9
5. Masse totale, masse d'une espèce, quantité de mouvement, énergie, chaleur .....	11
6. Transport convectif .....	11
7. Forces susceptibles de provoquer un écoulement .....	11
8. Conduction et diffusion .....	12
9. Situations induisant des transferts de chaleur ou de matière .....	13
10. Rôle du rayonnement .....	13
11. Régimes d'écoulement .....	14
12. Turbulence et phénomènes de transfert .....	15
13. Formation de sillages derrière des objets .....	16
14. Systèmes mono- ou polyphasiques .....	17
15. Phénomènes de transfert et changements d'état physique .....	18
16. Réactions chimiques ou biochimiques .....	18
17. Compétition entre cinétiques physiques et chimiques .....	19
18. Phénomènes permanents – Phénomènes établis .....	20
19. Commentaire .....	21

*Chapitre 2***Diffusion de la quantité de mouvement –  
Viscosité et paramètres rhéologiques de fluides non newtoniens**

1. Expérience fondatrice et loi de Newton . . . . .	23
2. Quelques brèves informations à propos de la viscosité. . . . .	26
3. Comportements non newtoniens . . . . .	26
4. À propos des applications . . . . .	29

*Chapitre 3***Bilans globaux dans le cas de systèmes isothermes  
et à composition constante**

1. Bilan global de masse . . . . .	32
2. Bilan global de quantité de mouvement . . . . .	33
3. Bilan global d'énergie mécanique. . . . .	35
4. Calcul des pertes par friction. . . . .	38
5. À propos des applications . . . . .	40

*Chapitre 4***Facteur de friction et coefficient de traînée**

1. Mise en place générale . . . . .	43
2. Facteur de friction pour l'écoulement dans des tubes rectilignes à section circulaire. . . . .	45
3. Coefficient de traînée pour l'écoulement autour d'obstacles solides .	50
4. À propos des applications . . . . .	55

*Chapitre 5***Conduction de la chaleur**

1. Expérience fondamentale et loi de Fourier . . . . .	57
2. Quelques brèves informations à propos de la conductivité thermique	58
3. Comparaison entre conductions de la quantité de mouvement et de la chaleur. . . . .	59
4. À propos des applications . . . . .	59

*Chapitre 6***Bilans globaux dans le cas de systèmes à température variable  
mais à composition constante**

1. Conservation de l'énergie . . . . .	63
2. Bilan global d'énergie mécanique. . . . .	65
3. À propos des applications . . . . .	66



*Chapitre 7***Coefficients d'échange de chaleur**

1. Position du problème et définition générale des coefficients d'échange	69
2. Transfert de chaleur entre un fluide et la paroi d'un tube cylindrique dans lequel il circule	71
3. Transfert de chaleur entre un courant fluide et des objets submergés	79
4. À propos des applications	81

*Chapitre 8***Diffusion d'une espèce dans un mélange**

1. Expérience fondamentale et loi de Fick unidirectionnelle	85
2. Quelques brèves informations à propos des coefficients de diffusion binaire	91
3. Comparaison entre diffusion de la quantité de mouvement et d'une espèce dans un mélange binaire	92
4. À propos des applications	92

*Chapitre 9***Bilans globaux pour des systèmes multiconstitutants**

1. Bilan de masse par espèce	96
2. Conservation de la quantité de mouvement	97
3. Conservation de l'énergie	97
4. Bilan d'énergie cinétique	97
5. À propos des applications	98

*Chapitre 10***Coefficients de transfert de matière**

1. Définitions des coefficients de transfert de matière dans des mélanges binaires	101
2. Corrélations à faible flux	105
3. Influence du mouvement convectif induit par les échanges de matière ; transferts à flux élevés	107
4. À propos des applications	111

*Thème 2*  
*Analyse locale*

*Chapitre 11*

**Quelques compléments sur les phénomènes de diffusion  
et de conduction**

1.	Comment caractériser un écoulement . . . . .	117
2.	Compléments sur la diffusion de la quantité de mouvement . . . . .	120
3.	Compléments sur la conduction de la chaleur. . . . .	126
4.	Compléments sur la diffusion de la matière . . . . .	127

*Chapitre 12*

**Les équations de bilan à l'échelle locale**

1.	Conservation de la masse – Équation de continuité . . . . .	130
2.	Conservation de la quantité de mouvement – Équations de mouvement . . . . .	133
3.	Conservation de l'énergie totale – Équations de bilan des énergies cinétique et thermique . . . . .	140
4.	Conservation de chaque espèce dans un mélange binaire. . . . .	148
5.	Quelques indications relatives à la formulation de conditions limites adéquates. . . . .	152
6.	À propos des applications . . . . .	153

*Chapitre 13*

**Analyse dimensionnelle des équations de changement –  
Théorie des maquettes**

1.	Adimensionnalisation des équations de changement . . . . .	157
2.	Théorie des maquettes – Problèmes d'extrapolation. . . . .	159
3.	À propos des applications . . . . .	160

*Chapitre 14*

**Phénomènes de transfert en régime turbulent**

1.	Quelques faits et commentaires. . . . .	166
2.	Établissement des équations de transport moyennes de la quantité de mouvement . . . . .	173
3.	Modélisation des transports turbulents . . . . .	180
4.	Turbulence et réactions chimiques . . . . .	196
5.	À propos des applications . . . . .	200



*Chapitre 15***Du local au global : démonstrations et compléments**

1. Définitions . . . . .	201
2. Conservation de la masse . . . . .	202
3. Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	206
4. Conservation de l'énergie . . . . .	212
5. Transport d'une espèce dans un mélange . . . . .	224
6. Traçage expérimental et numérique . . . . .	230
7. Vers une approche globale polyphasique . . . . .	232
8. Commentaires et résumés . . . . .	240

*Chapitre 16***Hydrodynamique des systèmes polyphasiques**

1. Principaux modes de mise en contact de phases . . . . .	246
2. Quelques grandeurs caractéristiques des milieux diphasiques . . . . .	251
3. Conservation de la masse . . . . .	265
4. Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	273
5. Exemple de modèle local à deux fluides gaz-liquide, dans lequel le gaz est dispersé sous forme de bulles . . . . .	286
6. Exemple de modèle 1D à deux fluides gaz-liquide en écoulement stratifié et en écoulement dispersé . . . . .	291
7. Exemple de modèle 1D fluide-solide : application au cas où le solide est fluidisé . . . . .	299
8. Exemple de modèle 1D triphasique gaz-liquide-solide en écoulement dispersé gaz-solide . . . . .	302
9. Exemple de modèle 0D liquide-solide dans lequel la phase solide est consolidée ou en état fixe . . . . .	308
10. À propos des applications . . . . .	312

*Chapitre 17***Compléments sur les phénomènes de diffusion dans les systèmes multiconstituants**

1. Perfectionnement de la loi de Fick . . . . .	316
2. Diffusion d'une espèce dans un mélange multiconstituant, mise en évidence des faits . . . . .	317
3. Loi de Stefan-Maxwell . . . . .	320
4. Loi de Stefan Maxwell dans le cas d'un système soumis à plusieurs forces externes . . . . .	324
5. Coefficient de transfert . . . . .	327
6. Commentaires . . . . .	333

*Deuxième partie***Utilisations en génie des procédés***Chapitre 18***Bilans matière et énergie en régime permanent**

1. Position du problème et contexte théorique .....	339
2. Analyse d'un procédé .....	340
3. Influence de l'architecture du procédé et quelques informations générales à propos du rôle des bilans dans la conception d'une unité	344
4. Cas d'une architecture unidirectionnelle .....	345
5. Recyclages et purges .....	348
6. Unité avec recyclage et purge .....	355
7. Commentaires .....	359

*Chapitre 19***Bilans matière et énergie en régime transitoire**

1. Position du problème et contexte théorique .....	361
2. Variations du niveau dans des cuves de stockage de liquides. ....	362
3. Évolution de la composition dans des réservoirs ou des réacteurs ...	367
4. Évolutions de la température et de la composition dans un réacteur .	372
5. Quelques commentaires .....	375

*Chapitre 20***Puissance nécessaire pour mettre un fluide en mouvement**

1. Position du problème et contexte théorique .....	377
2. Consommation d'énergie mécanique dans un circuit ouvert .....	377
3. Consommation d'énergie mécanique dans un circuit fermé .....	380
4. Commentaires .....	382

*Chapitre 21***Organes de mise en mouvement des fluides**

1. Position du problème et contexte théorique .....	383
2. Mise en mouvement des liquides .....	384
3. Mise en mouvement des gaz .....	394

*Chapitre 22***Mesure des pressions, des débits et des vitesses**

1. Position du problème et contexte théorique .....	399
2. Mesure des pressions. ....	399



3. Mesure des débits .....	406
4. Mesure des vitesses .....	412

### Chapitre 23

#### Conduction de la chaleur dans les solides – calorifugeage

1. Position du problème et contexte théorique .....	417
2. Conductivité thermique des solides .....	418
3. Conduction à travers des murs ou plaques, sans génération de chaleur	419
4. Conduction à travers des parois cylindriques sans génération de chaleur	424
5. Conduction à travers des parois sphériques sans génération de chaleur	429
6. Commentaires .....	431

### Chapitre 24

#### Premières informations sur les échanges et les échangeurs de chaleur

1. Position du problème et contexte théorique .....	433
2. Concept de coefficient d'échange global local .....	434
3. Du coefficient global local à l'échangeur complet .....	436
4. Commentaires .....	441

### Chapitre 25

#### Agitation et mélange : approches semi-empiriques

1. Position du problème et contexte théorique .....	443
2. Description des systèmes d'agitation .....	444
3. Quelques concepts globaux simples utilisés en agitation mécanique .	447
4. Mélange de liquides miscibles – temps de mélange .....	451
5. Chauffage ou refroidissement de fluides – Coefficients de transfert de chaleur .....	454
6. Agitation de fluides non newtoniens .....	455
7. Commentaires .....	456

### Chapitre 26

#### Principes généraux du génie des séparations

1. Position du problème et contexte théorique .....	457
2. Quelques généralités sur les principes mis en œuvre dans les séparations .....	457
3. Quelques généralités sur l'organisation des appareils de séparation .	458
4. Organisation et méthode de calcul des appareils à base d'étages théoriques .....	460
5. Méthode de calcul des appareils à l'aide du concept d'unité de transfert	467
6. Commentaires .....	475



*Chapitre 27***Phénomènes de transfert dans des tubes –  
Cas de fluides newtoniens en régime laminaire**

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	477
2. Transport en tubes de fluides newtoniens dont la masse volumique et la viscosité restent constantes, en régime permanent . . . . .	478
3. Écoulement longitudinal dans l'espace annulaire entre deux tubes coaxiaux . . . . .	487
4. Profil de température, en régime quasi établi, dans un fluide en écoulement laminaire, échangeant à travers la paroi à densité de flux constante $q_1$ . . . . .	488
5. Profil de concentration . . . . .	495
6. Commentaires finaux . . . . .	497

*Chapitre 28***Écoulements liquides en films : vers l'étude des colonnes à garnissage**

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	499
2. Concepts de point de charge et de point d'engorgement dans les colonnes garnies . . . . .	500
3. Ruissellement d'un liquide sur un plan incliné . . . . .	501
4. Écoulement diphasique entre deux plaques planes, verticales et parallèles . . . . .	506
5. Dissolution d'une espèce gazeuse dans un film liquide . . . . .	512
6. Commentaires . . . . .	520

*Chapitre 29***Phénomènes de transfert dans des tubes en régime turbulent**

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	521
2. Quelques informations expérimentales . . . . .	522
3. Profil de vitesse moyenne . . . . .	524
4. Solution numérique de l'écoulement turbulent en conduite . . . . .	534
5. Profil de température moyenne . . . . .	543
6. Profil de concentration moyenne . . . . .	549
7. Conclusions . . . . .	551

*Chapitre 30***Transport de fluides non newtoniens en régime laminaire**

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	553
2. Commentaires sur l'utilisation des lois rhéologiques . . . . .	553

3. Écoulement laminaire, dans un tube cylindrique, d'un fluide à seuil de contrainte . . . . .	557
4. Écoulement laminaire, dans un tube cylindrique, d'un fluide suivant la loi puissance . . . . .	561
5. Écoulement laminaire sur un plan incliné d'un fluide non newtonien	562
6. Écoulement de Couette – Introduction à la rhéométrie . . . . .	566
7. Commentaires finaux . . . . .	570

### Chapitre 31

#### La convection naturelle

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	571
2. L'approximation de Boussinesq . . . . .	572
3. Convection naturelle entre deux plaques verticales parallèles . . . . .	574
4. Convection naturelle le long d'une paroi verticale . . . . .	577
5. Commentaires . . . . .	581

### Chapitre 32

#### Analyse des écoulements dans les cuves agitées

1. Acquisition et traitement des données . . . . .	585
2. Champ de vitesses moyenne et organisée . . . . .	592
3. Transferts d'énergie . . . . .	598
4. Échelles caractéristiques de la turbulence . . . . .	604
5. Conclusions et perspectives . . . . .	607

### Chapitre 33

#### Diffusion en milieu stagnant – La théorie du film

1. Diffusion en milieu stagnant – L'expérience dite du tube de Stefan . . . . .	612
2. Diffusion couplée à une réaction chimique hétérogène . . . . .	620
3. Diffusion dans des milieux poreux . . . . .	628
4. Diffusion avec des réactions chimiques homogènes . . . . .	634
5. Quelques commentaires à propos de la théorie du film . . . . .	643

### Chapitre 34

#### Théorie de la couche limite

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	645
2. Les hypothèses et les équations de la théorie de la couche limite hydrodynamique . . . . .	648
3. Quelques commentaires à propos du gradient de pression et du décollement de la couche limite . . . . .	650
4. Couche limite hydrodynamique le long d'une plaque plane . . . . .	651



5. Théorie de la couche limite dans le cas de transferts simultanés, éventuellement avec des réactions chimiques . . . . .	656
6. Quelques généralités sur la résolution des équations de la couche limite hydrodynamique . . . . .	658

### Chapitre 35

#### Introduction aux théories de renouvellement de surface

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	661
2. Écoulement au voisinage d'une paroi horizontale brusquement mise en mouvement. . . . .	661
3. Conduction instationnaire de la chaleur à partir d'une plaque plane . . . . .	666
4. Diffusion instationnaire d'une espèce dans un mélange, à partir d'une plaque plane . . . . .	667
5. Vers les théories de renouvellement de surface . . . . .	669

### Chapitre 36

#### Mesures des diffusivités ou conductivités

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	671
2. Mesure de la viscosité de liquides. . . . .	672
3. La conductivité thermique. . . . .	683
4. La diffusivité d'espèce . . . . .	686
5. Remarques complémentaires. . . . .	692

### Chapitre 37

#### Condensation d'une vapeur pure

1. Position du problème et contexte théorique . . . . .	693
2. Présentation générale du phénomène de condensation . . . . .	694
3. Condensation d'une vapeur pure saturée sur une paroi plane verticale, en régime permanent . . . . .	695
4. Informations supplémentaires . . . . .	703

### Chapitre 38

#### Phénomènes de transfert autour d'une sphère solide

1. Introduction . . . . .	705
2. Écoulements autour d'une sphère fixe . . . . .	706
3. Transferts de chaleur et de matière . . . . .	712
4. Cas de la sphère isolée en chute libre . . . . .	715
5. Commentaires . . . . .	719

*Chapitre 39***Les couches fixes : structure, écoulement, transferts, réactions**

1. Position du problème et contexte théorique .....	721
2. Structure des lits fixes .....	723
3. Écoulement à travers un lit fixe .....	724
4. Transferts de matière et de chaleur fluide-particules en lit fixe .....	727
5. Modélisations plus complètes des lits fixes pour traiter les systèmes réactifs .....	728
6. Commentaires finaux .....	733

*Chapitre 40***La filtration par gâteau**

1. Position du problème et contexte théorique .....	735
2. Mise en forme générale dans le cas de gâteaux incompressibles .....	736
3. Filtration à pression constante .....	737
4. Filtration à débit constant .....	739
5. Filtre alimenté par une turbopompe .....	739
6. Cas de gâteaux compressibles .....	741
7. Commentaires .....	742

*Chapitre 41***Fluidisation**

1. Position du problème et contexte théorique .....	743
2. Expérience et phénomènes fondamentaux .....	744
3. Détermination des limites de la fluidisation .....	748
4. Fluidisation par des liquides .....	751
5. Fluidisation par des gaz .....	755
6. Commentaires .....	758

*Chapitre 42***Agitation des milieux diphasiques**

1. Position du problème et contexte théorique .....	761
2. Quelques brèves informations à propos de la géométrie des systèmes d'agitation de milieux diphasiques .....	762
3. Systèmes solide-liquide .....	763
4. Systèmes liquide-liquide .....	768
5. Systèmes gaz-liquide .....	773
6. Commentaires sur les phénomènes de transfert .....	781
7. Commentaire final .....	782



*Chapitre 43***Analyse et modélisation du fonctionnement des air-lifts**

1. Introduction . . . . .	783
2. Description de l'équipement pilote, étude expérimentale et outil numérique. . . . .	784
3. Modélisation locale de l'air-lift. . . . .	787
4. Analyse globale. . . . .	803
5. Conclusion. . . . .	813
<b>Nomenclature</b> . . . . .	815
<b>Index</b> . . . . .	819