



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 multiconstituant**

| | |
|---|----|
| 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 |
| Nomenclature | 815 |
| Index | 819 |