

Emilian Koller

Aide-mémoire
Génie chimique

4^e édition

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Du même auteur

Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues
Dunod, 2009.

Dictionnaire encyclopédique des sciences des matériaux
Dunod, 2008.

Dictionnaire encyclopédique du génie des procédés
Dunod, 2006.

Illustration de couverture : © Tomas Sereda – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
	

© Dunod, Paris, 2001, 2005, 2010, 2013
ISBN 978-2-10-070465-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e 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 donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

1 • Introduction au génie chimique	1
1.1 Généralités	1
1.2 Historique	2
1.3 Opérations de génie chimique	3
1.4 Remarques et conclusions	5
2 • Opérations unitaires	7
2.1 Généralités	7
2.2 Classification des opérations unitaires	8
2.3 Modes de mise en contact	14
2.4 Techniques de séparation	15
2.5 Principes de base	17
2.6 Étage théorique	19
2.7 Bilans	20
3 • Phénomènes de transport	23
3.1 Considérations générales	23
3.2 Transfert thermique	26
3.3 Transfert de matière	36
3.4 Transport et stockage des fluides	43
3.5 Nombres caractéristiques (NC)	55

4 • Sédimentation et décantation	57
4.1 Généralités	57
4.2 Vitesse de sédimentation	59
4.3 Types de décantations	62
4.4 Appareillage et procédure de dimensionnement	67
4.5 Séparation des liquides non miscibles	73
4.6 Flottation	78
4.7 Lavage à contre-courant	79
4.8 Décantation centrifuge	81
5 • Homogénéisation, agitation et mélangeage	85
5.1 Généralités	85
5.2 Mélangeage par barbotage	88
5.3 Mélangeage par circulation forcée du liquide	91
5.4 Mélangeage par dispositifs mécaniques rotatifs	95
6 • Fragmentation et séparation des solides	105
6.1 Généralités	105
6.2 Conditions et techniques de broyage	109
6.3 Appareillage	113
6.4 Séparation des solides	123
7 • Agglomération des solides	125
7.1 Généralités	125
7.2 Mécanismes d'agglomération	127
7.3 Agglomération sans compression : la granulation	133
7.4 Agglomération avec compression	138
7.5 Enrobage	145
8 • Filtration	147
8.1 Généralités	147
8.2 Théorie de la filtration	151

8.3	Choix des filtres	160
8.4	Appareillage	162
8.5	Traitement de post-filtration	172
8.6	Filtration centrifuge (essorage)	176
9 •	Fluidisation	179
9.1	Définitions et généralités	179
9.2	Hydrodynamique du lit fluidisé	180
9.3	Considérations théoriques	184
9.4	Techniques et appareillage	192
9.5	Applications industrielles des lits fluidisés	201
10 •	Lavage et dépoussiérage des gaz	207
10.1	Généralités	207
10.2	Procédés mécaniques de séparation	211
10.3	Procédés de séparation à tissus filtrants	217
10.4	Procédés de séparation par lavage des gaz	222
10.5	Procédés électrostatiques de séparation	226
10.6	Séparateurs (capteurs) de brouillards	230
10.7	Zone d'empoussiérage contrôlé	231
11 •	Séparation par membranes	235
11.1	Généralités	235
11.2	Structure et composition des membranes	237
11.3	Filtration membranaire	248
11.4	Osmose inverse	251
11.5	Dialyse	254
11.6	Électrodialyse	255
11.7	Perméation gazeuse et pervaporation	257
12 •	Évaporation	263
12.1	Généralités	263
12.2	Facteurs principaux influençant l'évaporation	269

12.3	Transfert de chaleur	273
12.4	Étude thermique de l'évaporation	277
12.5	Méthodes diminuant la consommation d'énergie	282
12.6	Dispositifs annexes à l'évaporateur	288
13	• Cristallisation	295
13.1	Généralités	295
13.2	Théorie de la cristallisation	298
13.3	Techniques de cristallisation	302
13.4	Bilan thermique et de matière	308
13.5	Appareillage de la cristallisation	316
14	• Séchage des solides	325
14.1	Généralités	325
14.2	Modes de séchage	334
14.3	Cinétique du séchage	340
14.4	Principes de calcul des sècheurs	343
14.5	Appareillages et applications	348
14.6	Choix du procédé de séchage	349
15	• Absorption	357
15.1	Généralités	357
15.2	Équilibre gaz-liquide	359
15.3	Calcul des colonnes d'absorption	361
15.4	Absorption par réaction chimique	370
15.5	Contacteurs gaz-liquide	372
16	• Sublimation	381
16.1	Généralités	381
16.2	Considérations théoriques	382
16.3	Procédés de sublimation	386
16.4	Calcul de la sublimation	389
16.5	Appareils et installations de sublimation	394
16.6	Lyophilisation	396

17 • Adsorption	401
17.1 Définition et applications	401
17.2 Considérations théoriques	404
17.3 Cinétique de l'adsorption	408
17.4 Adsorbants	412
17.5 Procédés et appareillage	413
17.6 Procédés de régénération	421
17.7 Cas d'adsorptions particulières	423
18 • Distillation et rectification	429
18.1 Généralités	429
18.2 Équilibres liquide-vapeur	430
18.3 Distillation simple	436
18.4 Rectification (distillation avec reflux)	442
18.5 Appareillage	463
18.6 Distillations particulières	473
19 • Extraction liquide-liquide	477
19.1 Généralités	477
19.2 Considérations théoriques	479
19.3 Procédés d'extraction liquide-liquide	485
19.4 Appareillage	498
20 • Biotechnologies	505
20.1 Généralités	505
20.2 Catalyseurs biologiques	508
20.3 Ingénierie biotechnologique	513
20.4 Applications de la biotechnologie industrielle	537
21 • Réacteurs chimiques	545
21.1 Généralités	545
21.2 Classification des réacteurs	547

21.3	Types de réacteurs	551
21.4	Calcul des réacteurs	562
21.5	Contrôle, régulation et sécurité	567
22 •	Conception et développement des procédés	569
22.1	Généralités	569
22.2	Management du projet	571
22.3	Machines et équipements	586
22.4	Installations pilotes et extrapolation des résultats	594
22.5	Optimisation des procédés	597
22.6	Contrôle-commande des procédés	599
22.7	Calculs économiques	604
23 •	Sécurité et gestion du risque chimique	607
23.1	Généralités	607
23.2	Risques d'incendie-explosion	610
23.3	Risques d'emballement d'une réaction	623
23.4	Risques d'agression corporelle	627
23.5	Risques de pollution	630
ANNEXE		
	Terminologie et symboles	635
	Terminologie	635
	Symboles et notations	637
	Unités de mesure	641
	Bibliographie	643
	Index alphabétique	649

1 • INTRODUCTION AU GÉNIE CHIMIQUE

1.1 Généralités

Le génie chimique se livre à l'étude, à la construction, à la détermination de l'agencement, aux conditions opératoires et au fonctionnement de l'appareillage, souvent très spécial et très complexe, nécessaires à la gestion des réactions chimiques industrielles tout au long de leur déroulement. Cette démarche relève de l'ingénierie et du bureau d'études. Elle s'appuie sur les connaissances fondamentales ou, à défaut, sur des corrélations établies à partir de l'expérience ; un aspect plus technique concerne le choix des appareils et des matériaux avec lesquels seront réalisées les installations.

Le génie chimique fait appel à des disciplines très diverses telles que : la thermodynamique chimique, qui permet de prévoir la possibilité et les caractéristiques énergétiques des réactions ; la cinétique physique, qui s'intéresse aux transformations de la matière, de la chaleur et de la quantité de mouvement ; la dynamique des systèmes, qui étudie le comportement transitoire et la commande automatique des processus ; l'optimisation, qui tient compte des paramètres d'ordre technique et économique pour réaliser un objectif déterminé.

Le génie chimique n'est pas une simple combinaison de physique, de mathématiques et de chimie appliquée, c'est aujourd'hui une discipline autonome qui a développé ses propres concepts. Il ne doit pas non plus être confondu avec la chimie industrielle, qui s'intéresse plus spécifiquement

aux enchaînements de réactions, aux produits et aux conditions à mettre en œuvre dans le procédé (catalyseurs, pressions, températures).

L'aspect fondamental du génie chimique concerne les méthodes générales et les principes de base permettant de décrire les transformations et d'analyser le fonctionnement des procédés à différents niveaux : processus physico-chimiques élémentaires mis en jeu, unités d'opérations (réacteurs, échangeurs, séparateurs, etc.) et grands systèmes résultant d'une association complexe de plusieurs unités d'opérations pour constituer un atelier ou une usine. Ces méthodes relèvent des sciences du génie chimique. Enfin un ensemble de règles et des procédures permettent de concevoir, dimensionner, construire et faire fonctionner les dispositifs dans lesquels seront conduites les opérations.

1.2 Historique

La date de naissance du génie chimique moderne peut être située entre 1915, où A. D. Little définit le concept d'*opération unitaire*, et 1923, où ce concept est repris dans un ouvrage de W. H. Walker, W. K. Lewis et W. H. Mc Adams, *Principles of Chemical Engineering*. Pour la première fois, des opérations concernant le transport des fluides, les échanges de chaleur, les changements de phase, les techniques de séparation, font l'objet d'études en soi et de théories quantitatives. La seconde révolution a lieu en 1960 avec la publication du livre *Transport Phenomena* de R. B. Bird, W. E. Steward et E. N. Lightfoot, où sont analysés en profondeur les processus élémentaires de transport de matière, d'énergie et de quantité de mouvement qui sont à la base des opérations unitaires. Vers la même époque, le couplage de ces processus avec la réaction chimique est pris en compte, dans une théorie générale des réacteurs chimiques. C'est une étape décisive vers une compréhension fondamentale et unitaire du fonctionnement des procédés. Simultanément, le développement des moyens de traitement de l'information ouvre la voie aux modèles mathématiques et aux représentations conceptuelles abstraites qui caractérisent le génie chimique moderne. Les années 1970-1980 voient un retour à une meilleure prise en compte des contraintes socio-économiques, en particulier la protection de l'environnement. Aujourd'hui, la crise de

l'énergie (recherche de substituts au pétrole, utilisation rationnelle de l'énergie), la nécessité de développer une chimie fine à haute valeur ajoutée et l'avènement prévisible des biotechnologies offrent de nombreuses perspectives au développement du génie chimique.

1.3 Opérations de génie chimique

On définit un *procédé* (industriel) par la traduction en termes industriels d'un mode opératoire permettant d'obtenir un produit dans la quantité requise et avec la qualité requise, à partir de matières premières, d'énergie et d'informations.

L'analyse d'un procédé montre que les phases de réaction proprement dites (c'est-à-dire celles qui aboutissent à une transformation de la nature de la molécule) ne constituent qu'une partie de l'ensemble du procédé mis en œuvre. Elles sont presque toujours précédées, accompagnées et/ou achevées par des phases de traitement physico-chimique permettant de faciliter l'introduction des réactifs, le bon déroulement des opérations, l'extraction des produits résultant des réactions. Ces différentes phases peuvent intervenir séparément ou simultanément dans une zone déterminée du dispositif et au moment choisi comme le plus avantageux pour la bonne marche des opérations.

Cet enchaînement d'opérations types, dont le principe se retrouve d'un procédé à l'autre, quelle que soit la nature du produit fabriqué, a conduit à l'idée de diviser le génie chimique en deux parties principales (figure 1.1) :

- les *réacteurs chimiques*, qui permettent à une réaction chimique de s'accomplir ;
- les *opérations unitaires*, grâce auxquelles on prépare les réactifs et on effectue les séparations des constituants d'un mélange qui permettent ainsi le bon fonctionnement du réacteur chimique.

Le réacteur chimique est le « cœur du procédé ». Son fonctionnement (conversion, distribution des produits) conditionne en grande partie la nature des installations de préparation de la charge et de séparation des produits.

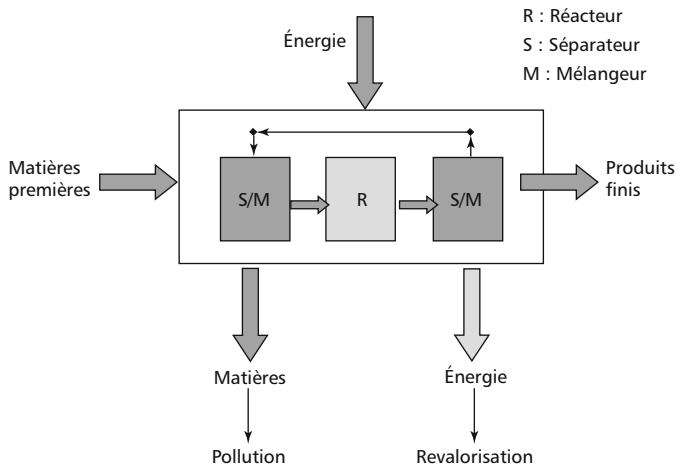


Figure 1.1 – Illustration schématique d'une transformation chimique.

Les opérations unitaires concernent le traitement de la matière première et la séparation des produits issus de la réaction, celle-ci n'étant en général ni totale ni sélective, ce qui implique un recyclage des matières premières ainsi que des rejets de matière. Quant aux procédés dits « physiques », ils ne comportent que les opérations de séparation et/ou de mélange.

Il est nécessaire de rappeler que dans les industries chimiques, métallurgiques, pharmaceutiques, agroalimentaires, les opérations de séparation représentent bien souvent l'essentiel de l'investissement et du coût de certains produits finis. Ces coûts sont par ailleurs d'autant plus élevés que les substances à séparer sont moins abondantes dans les mélanges desquels elles sont extraites.

La maîtrise de ces opérations unitaires est essentielle pour optimiser les conditions technico-économiques de la production et répondre aux exigences de la compétition industrielle (coûts de production, qualité des produits, flexibilité, environnement, etc.). Le procédé doit donc s'adapter au marché et aux matières premières, ce qui nécessite une souplesse technique et une bonne maîtrise des paramètres de fonctionnement.

Remarque

La conception d'un procédé de fabrication et sa réalisation complète jusqu'à la production constituent un patrimoine potentiel pour les sociétés : celles-ci ont alors la possibilité de construire des unités analogues sur d'autres sites et, si l'occasion se présente, de vendre les plans ou même une installation « clés en main », c'est-à-dire prête à fonctionner.

1.4 Remarques et conclusions

Un certain nombre de sujets traités dans cet ouvrage ne sont pas des opérations unitaires à proprement parler, ni même toujours du génie chimique, mais leur présentation préalable est indispensable ici en raison de leur importance dans le bilan énergétique des installations. Il s'agit soit de la physique à la base du génie chimique, soit de technologies non spécifiques, mais présentant un grand intérêt pour l'industrie chimique :

- la dynamique des fluides et, à la suite, le stockage et le déplacement des fluides;
- la transmission de la chaleur, qui intervient dans presque toutes les opérations unitaires;
- les équilibres physiques entre phases, qui sont des notions fondamentales pour la compréhension de beaucoup d'opérations unitaires.

En conclusion, pour transformer un produit à partir d'une matière disponible, on doit établir les structures chimiques fondamentales, autrement dit le procédé, choisir le réacteur, définir la ou les opérations unitaires et enfin envisager son contrôle et sa commande. Le parcours de toutes ces étapes constitue la procédure de traitement d'un problème de génie chimique. Vu les exigences de la compétition industrielle, il est évident que la tâche de chaque ingénieur de génie chimique est d'optimiser le procédé afin de concevoir et réaliser des installations de production qui soient de plus en plus performantes et avec un maximum de sécurité.

Toutes les installations de l'industrie chimique ne sont pas réservées à la production d'un seul produit; les plus nombreuses sont polyvalentes afin de pouvoir s'adapter à la demande. Elles offrent donc la possibilité

de mettre en œuvre des procédés différents. Dans certains cas exceptionnels, cette polyvalence peut être très complète (installation pilote), mais elle est coûteuse puisqu'elle complique les appareils et leur fonctionnement, et pèse sur les coûts de production.

Avant le passage à l'échelon industriel, l'utilisation d'une installation pilote est fréquente. Cette étape permet de vérifier la fiabilité du système et d'affiner la recherche du meilleur rendement. Accessoirement, les substances obtenues dans l'installation pilote permettent d'anticiper la production industrielle et d'effectuer des essais d'utilisation, et la détermination des propriétés physico-chimiques et toxicologiques. L'installation définitive tient compte de ces études préliminaires; elle pourra être modifiée pour remédier à des anomalies ou devenir plus performante.

Les méthodes imaginées pour industrialiser les procédés chimiques peuvent être adaptées à tous les procédés industriels de transformation de la matière et de l'énergie. Il s'agit d'identifier les processus physico-chimiques élémentaires, de décrire l'écoulement des fluides et des solides, d'établir des modèles mathématiques qui permettent de comprendre les processus, de choisir et de dimensionner les équipements et finalement de conduire les installations de manière optimale, sans oublier les objectifs économiques.

Il faut encore souligner que le génie chimique, science jeune, a rapidement évolué et provoqué la création de toute une série de sciences parallèles telles que le *génie agroalimentaire*, le *génie environnemental*, le *génie nucléaire*, le *génie biochimique*, etc. On a ainsi aujourd'hui tendance à parler de *génie des procédés*, c'est-à-dire l'application, à d'autres domaines, de la méthodologie propre du génie chimique.

Cette démarche générale du « génie des procédés » est très novatrice car l'industrie était organisée historiquement par « métiers » autour des filières de produits.

2 • OPÉRATIONS UNITAIRES

2.1 Généralités

Les opérations sont dites *unitaires* car elles sont fondées sur des règles de nature physique à caractère général et traduisent des transformations simples.

Le principe fondamental de toute opération unitaire est toujours le même, à savoir la préparation et la mise en contact intime des phases en présence pour assurer le développement des réactions, les mécanismes de transport et de transfert de masse (ou matière), de chaleur et de quantité de mouvement qui ont lieu durant la chaîne de transformation, ainsi que la séparation des constituants du mélange résultant.

Les opérations unitaires représentent donc un concept utilisé par les ingénieurs chimistes afin de permettre de façon optimale la transformation des substances brutes déterminées en un ou plusieurs produits (naturels ou artificiels) commercialisables ou en produits de base destinés à une autre usine chimique.

Le choix d'une opération unitaire dépend de différentes considérations :

- la possibilité effective de séparation sur des bases thermodynamiques;
- la possibilité offerte par la cinétique physique d'avoir un transfert plus ou moins rapide selon la nature des phases en présence;
- la volonté d'utiliser préférentiellement certaines sources d'énergie (par exemple l'énergie électrique);
- le souhait d'économiser de l'énergie ou de diminuer les frais de fonctionnement ainsi que celui d'abaisser les coûts d'investissement.

Toute une série d'opérations, dites *opérations auxiliaires*, ne figurent pas dans cet ouvrage, bien qu'elles existent dans beaucoup de procédés et dans toutes les usines de production chimique. Il s'agit :

- du transport et du stockage de produits solides, liquides ou gazeux;
- du captage et du traitement de l'eau pour divers procédés, ainsi que de l'assainissement des eaux résiduaires;
- de la production de la vapeur, du froid et du vide;
- de la mesure et du contrôle de divers paramètres (température, pression, débits, niveaux, concentrations, etc.);
- des méthodes d'analyse élémentaires destinées à l'identification et au dosage des éléments présents dans une substance.

2.2 Classification des opérations unitaires

Une classification universelle et exhaustive satisfaisante est difficile. Cependant, malgré l'appareillage très varié nécessaire pour la production industrielle, il est possible de classer les opérations unitaires de plusieurs manières.

2.2.1 Classification selon les phénomènes physiques mis en œuvre

Les principales opérations mettant essentiellement en jeu des processus physiques, on peut ainsi les rattacher aux deux grandes familles suivantes.

■ Opérations unitaires avec ou sans transfert de matière

À leur tour les opérations unitaires peuvent se diviser en deux grandes classes :

- les processus de séparation par diffusion (évaporation, distillation, absorption, sublimation, adsorption, etc.) qui conviennent aux alimentations formées par mélanges homogènes;
- les processus sans transfert de matière qui sont d'une part les opérations de simple séparation mécanique des mélanges hétérogènes (filtration, cyclonage, centrifugation), d'autre part les opérations modifiant la granulométrie de solides (broyage, frittage).

■ Opérations unitaires avec ou sans transfert de chaleur

Souvent, les opérations unitaires nécessitent un transfert de chaleur, ainsi il est possible de réaliser une classification en se rapportant aux quantités d'énergie thermique mises en jeu. On distingue :

- les opérations se déroulant sans (ou pratiquement sans) transfert de chaleur, telles que :
 - ultrafiltration, osmose inverse, extraction par liquide (pour un transfert de masse entre phases fluides);
 - adsorption, échange d'ions, chromatographie en phase liquide, lixiviation (pour un transfert de masse entre phases fluides et solides);
- les opérations nécessitant d'importants échanges de chaleur :
 - distillation, évaporation, séchage des liquides (pour un transfert de masse entre phases fluides);
 - cristallisation, lyophilisation, cryoconcentration (pour phases fluides-solides);
- les opérations mixtes qui ont lieu de manière isotherme ou non, selon les concentrations considérées et qui intéressent surtout les épurations en présence d'une phase gazeuse inerte en excès :
 - absorption, désorption (phases fluides);
 - adsorption en phase vapeur, chromatographie en phase gazeuse, séchage des solides.

Remarque

Il est évident que certaines opérations mettent en œuvre des phénomènes thermiques et de matière : elles sont rangées dans le groupe correspondant au phénomène principal mis en jeu.

2.2.2 Classification selon les fonctions des opérations unitaires

Pour plus de clarté, on envisage, dans la suite, les opérations unitaires sous l'angle d'une classification à partir de leur fonction telle qu'elle est résumée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 – Classification des opérations unitaires selon leur fonction.

Opérations unitaires	Fonctions
<i>Opérations fondées sur la mécanique des fluides</i>	
Manipulation et transport des fluides	Stockage et transport des fluides. Contrôle et mesure du débit de gaz, liquide et vapeur.
Homogénéisation et agitation	Mise en contact des liquides, solides et gaz afin d'obtenir un mélange homogène des fluides ou un contact intime des phases.
Filtration et clarification	Séparation des particules solides à partir d'un liquide ou gaz.
Épaississement et sédimentation	Concentration des solides à partir de leur mélange avec des liquides.
Classification	Séparation des particules solides en groupes présentant de propriétés différentes (dimension, masse volumique, composition chimique, etc.).
Centrifugation	Séparation d'un mélange de deux phases liquides ou d'une phase solide en suspension dans une phase liquide, par l'action de la force centrifuge.
<i>Opérations fondées sur le transfert thermique</i>	
Échange de chaleur et condensation	Échauffement, refroidissement et condensation des fluides avec ou sans changement d'état.
Fours industriels Évaporation et ébullition	Chauffage à haute température des matériaux. Évaporation des liquides, concentration des solutions de solides non volatiles, récupération de l'eau distillée.
Séchage	Récupération de l'humidité ou d'autres liquides d'un solide par évaporation ou autres moyens.

<i>Opérations fondées sur le transfert thermique</i>	
Tours de refroidissement et réfrigération	Refroidissement de l'eau afin de la réutiliser dans les condenseurs ou installations de conditionnement d'air.
<i>Opérations fondées sur le transfert de matière</i>	
Distillation	Séparation des liquides miscibles par évaporation.
Extraction liquide-liquide	Séparation des liquides miscibles par différence de solubilité.
Lixiviation	Extraction des substances solides dissoutes dans un liquide par un solvant.
Absorption et désorption	Lavage des gaz solubles d'un mélange ayant un constituant inerte par un liquide. Récupération des gaz dissous dans un liquide.
Adsorption	Récupération sélective des substances à partir de liquides ou gaz par réaction chimique avec des solides.
Échange d'ions	Échange réversible avec les ions de même signe des différentes solutions. Adoucissement de l'eau.
Diffusion des gaz, humidification et déshumidification	Séparation des mélanges gazeux par différence de température ou par d'autres méthodes spécifiques. Contrôle de l'humidité ou de la vapeur contenue dans un gaz.
<i>Opérations fondées sur des principes mécaniques</i>	
Tamissage	Triage des particules solides selon leur dimension à l'aide d'un tamis.
Stockage et déplacement des solides	Transport des solides. Stockage et chargement en quantité contrôlée dans un appareil de fabrication.

Opérations fondées sur des principes mécaniques	
Fragmentation et agglomération des solides	Réduction des solides en particules plus petites. Compactage des solides en augmentant leur masse volumique.
Flottation	Séparation des solides par aération sélective.
Séparation magnétique ou électromagnétique	Séparation des solides d'après leur composition chimique ou des solides à partir de gaz par des méthodes électriques.

2.2.3 Classification selon les modes de réalisation

Enfin, on peut également classer les opérations unitaires d'après leurs régimes de fonctionnement. Certaines opérations sont menées en discontinu (*batch*), par charges successives, d'autres sont conduites en continu. Un système fonctionne en régime permanent si toutes ses caractéristiques (pression, concentration, température) sont constantes dans le temps. Dans le cas contraire, par exemple lors des démarrages ou des changements de marche, l'opération est dite en régime transitoire.

■ Processus continu et discontinu

Dans un *processus continu*, dans la mesure où le fonctionnement est parfait, les différents paramètres, notamment les débits, sont constants dans le temps en chaque point de l'installation. Les réactifs à mélanger, ou le mélange à séparer, arrivent en un point de l'appareillage, tandis que la masse après réaction ou les produits séparés sortent en d'autres points. Il faut noter que le fonctionnement en continu permet généralement une régulation automatique très poussée qui conduit à une qualité absolument constante du produit. Dès lors le travail en continu convient pour une fabrication déterminée et, étant donné la haute technologie et la fiabilité du matériel, implique une longévité commerciale du produit à fabriquer ainsi que des productions journalières très élevées, afin de rentabiliser l'investissement très important.

Avantages :

- qualité de production constante ;
- coût de production inférieur à celui d'une opération discontinue ;
- besoins réduits en personnel ;
- plus grande sécurité et meilleures conditions sanitaires (automatisation et pilotage déporté de l'installation).

Inconvénients :

- investissements élevés (notamment pour contrôles et régulations) ;
- nécessité d'une régularité dans la qualité des matières premières ;
- spécificité de l'appareillage.

Dans un *processus discontinu*, la situation du système change constamment dans le temps et plusieurs phases de l'opération peuvent être exécutées successivement dans le même appareil ; en continu, ces diverses phases ont lieu simultanément, chacune d'entre elles dans un appareil spécialisé.

Avantages :

- appareillage polyvalent, charges faibles ;
- pas de problème de circulation de certaines matières (pâtes) ;
- parfois rendements plus élevés.

Inconvénients :

- coût énergétique élevé (chauffage et refroidissement pour chaque charge) ;
- temps morts (remplissage, soutirage, refroidissement...) ;
- besoin élevé en personnel (manutention, surveillance...) ;
- qualité de production pouvant évoluer dans le temps ;
- coût de production élevé.

■ Processus séquentiels et semi-continus

Entre ces deux catégories principales, on trouve les régimes de marche séquentielle et les régimes semi-continus.

La *marche séquentielle* est un fonctionnement en continu qui n'est perturbé que de temps en temps par une séquence en discontinu qui n'interrompt ni l'entrée ni la sortie des réactifs principaux (par exemple l'évacuation du solide hors de l'appareil dans la filtration de poussières contenues dans un gaz).

Une opération est dite *en semi-continu* lorsqu'il y a alimentation et/ou sortie d'au moins un réactif pendant un temps important, mais qu'il doit y avoir interruption à intervalles réguliers (par exemple l'envoi en continu d'un mélange de gaz dans une masse déterminée d'un liquide capable de retenir sélectivement l'un des gaz).

2.3 Modes de mise en contact

Il existe diverses procédures de mise en contact entre phases dans une unité d'opération : les principales sont le co-courant, le contre-courant, les courants croisés et l'alimentation distribuée. Le contre-courant permet en principe un échange plus poussé parce qu'il met en contact les fractions s'appauvrissant avec des fractions de pouvoir d'échange croissant. Dans certains appareils (échangeurs de chaleur, colonnes à pulvérisation), il y a une variation continue de la température ou de la composition dans chaque phase le long de l'axe de l'appareil. Il importe alors d'éviter que le mélange en retour et la dispersion axiale ne viennent mélanger à nouveau des fractions ayant subi une évolution progressive entre l'entrée et la sortie et fassent ainsi chuter l'efficacité. Dans d'autres dispositifs, au contraire, on réalise un étagement géométrique de zones bien mélangées au moyen de cuves en série ou d'écrans évitant le mélangeage axial.

La plupart des schémas de procédé associent plusieurs unités d'opération comportant de nombreux recyclages où des courants de matière à différents stades de leur évolution sont renvoyés en amont de manière à réaliser plusieurs passes à travers les unités.

Lorsqu'on désire une séparation poussée, on a recours à des méthodes qui consistent à renouveler de nombreuses fois l'opération. En effet, pour obtenir un alcool très pur à partir d'un jus de fermentation par exemple, il faut se contenter de distiller une faible fraction du jus, sinon, à mesure que celui-ci s'appauvrit en alcool, on entraîne de plus en plus d'impuretés. On peut, dans ce cas, distiller une seconde fois le produit impur, voire redistiller le produit de cette seconde distillation, etc. Ainsi on procède à une répartition simple, portant uniquement sur le produit. Ces opérations de répétition et/ou de recyclage peuvent être mises en œuvre dans une succession de séparateurs que l'on appelle une *cascade*.

La cascade à contre-courant, qui réalise répétition et recyclage à la fois sur les produits et les résidus, est la plus utilisée, car c'est celle qui réalise le meilleur compromis entre qualité et quantité.

2.4 Techniques de séparation

La plupart des transformations chimiques, bien qu'ayant une haute sélectivité, c'est-à-dire formant le produit que l'on cherche à obtenir de manière prédominante, aboutissent à des mélanges de produits. Le fractionnement d'un mélange complexe en plusieurs « coupes », la séparation et l'isolement de ses constituants, l'extraction d'un composé particulier, la purification d'un produit sont des opérations clés dans la plupart des procédés. Une définition aussi large recouvre des réalités très diverses allant du tri des ordures ménagères au rein artificiel en passant par la distillation du pétrole. Tout procédé de séparation consiste à obtenir dans un séparateur, à partir d'une alimentation (flux entrant) A, deux (ou plusieurs) effluents B et C de composition différente (figure 2.1).

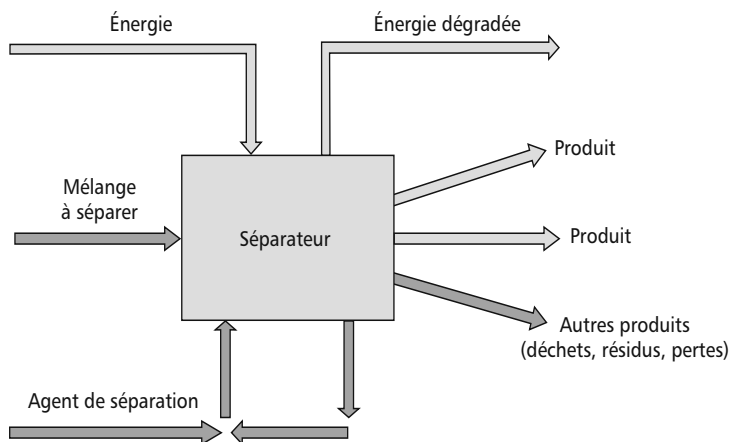


Figure 2.1 – Schéma général d'une opération de séparation.

Cette alimentation peut être discontinuée (le mélange est, par exemple, introduit en une fois au début de l'opération), comme dans l'évaporateur ou le tamis ; elle peut être pratiquement continue (les flux et compositions sont constants, en un point donné, dans le temps), comme dans le cas d'une colonne de rectification. En sortie du séparateur se trouvent les *produits*, c'est-à-dire les flux de matière qui sortent du procédé. Comme l'alimentation du mélange, la sortie des produits peut être discontinuée ou continue.

Une séparation ne peut se concevoir sans l'action d'un *agent séparateur* et de l'énergie. L'agent séparateur est par exemple la résine échangeuse d'ions, dans le cas d'une opération d'adoucissement ; son rôle est de stocker temporairement certains constituants du mélange (ici, le calcium) et de les restituer dans une phase distincte de régénération. La régénération remet l'agent de séparation en état de commencer un nouveau cycle : il est donc recyclé, comme l'évoque la figure. La thermodynamique montre que toute séparation nécessite la dégradation d'une certaine quantité d'énergie (ou encore la consommation d'une certaine quantité d'énergie libre). Ce « minimum thermodynamique » est très inférieur à ce qui est réellement mis en jeu en pratique (plusieurs dizaines de fois dans une distillation bien conçue ; plusieurs centaines de milliers de fois lors de l'enrichissement de l'uranium).

Au-delà des différences évidentes de taille et de nature des objets à séparer, des analogies profondes peuvent exister entre des méthodes en apparence très éloignées, ce qui permet une classification logique des méthodes de séparation.

Ainsi, on distinguera une première classe de méthodes où la séparation résulte d'un *partage des constituants entre deux phases* (phases liquide et vapeur dans l'évaporateur ; phases liquide et solide dans l'adoucisseur). La sélectivité provient essentiellement de facteurs thermodynamiques. On remarque deux sous-familles selon la façon dont est créée la deuxième phase : apport d'un agent de séparation (comme la résine échangeuse d'ions) ou transformation de la phase à traiter par apport d'énergie (création d'une phase vapeur). En fait, on peut considérer l'énergie comme un agent de séparation particulier. Exemple : la distillation, l'entraînement par un gaz inerte, l'absorption extractive, l'extraction, la cristallisation fractionnée, l'adsorption, l'échange d'ions, le lavage,

l'osmose, le moussage-essorage, la flottation, la désublimation, la lyophilisation, la filtration sur gel, la fusion de zone.

Une deuxième classe est celle où la séparation résulte d'une *migration différenciée* des constituants. Le principe de séparation repose :

- soit sur l'existence de vitesses de transfert différentes à travers une *barrière* (comme le tamis) : par exemple la diffusion gazeuse, la dialyse, l'électrodialyse, la perméation gazeuse, l'électrophorèse, l'ultracentrifugation, l'osmose inverse, l'ultrafiltration, la distillation moléculaire ;
- soit sur l'existence de propriétés physiques différentes des constituants d'une alimentation hétérogène dans un champ de forces : masses volumiques, tailles des particules, charges électriques, etc., différentes. Les procédés de séparation correspondants sont souvent décrits comme des procédés mécaniques de séparation. On y trouve la filtration, la sédimentation, la centrifugation, la précipitation électrostatique, etc.

On peut mentionner également une troisième classe de méthodes fondées sur la séparation mécanique des solides divisés.

D'autres critères de classement sont fondés sur la nature des phases mises en jeu, la nature de la barrière, la forme d'énergie apportée, le mode de mise en contact des phases, la nature des constituants séparés (molécules, particules, etc.).

2.5 Principes de base

Pour étudier des procédés ou des processus intervenant dans les opérations unitaires, il faut tout d'abord les « idéaliser », c'est-à-dire les imaginer ou les modéliser, c'est-à-dire aussi convenir de certaines hypothèses.

Quelques exemples d'hypothèses de travail :

- le fluide gazeux obéit à la loi des gaz parfaits ;
- le mélange de liquide est idéal, il ne s'accompagne pas de variation de volume ;
- la réaction se déroule dans un réacteur où le mélangeage est parfait, de sorte que les propriétés sont égales en tous points du réacteur ;
- la pression de la colonne à distiller est uniforme, etc.

Quand les hypothèses de l'étude sont fixées, le génie chimique dispose alors de trois groupes de relations fondamentales.

1. Les *lois de conservation*, afin d'écrire des bilans :

- exprimant la conservation de la matière ;
- exprimant la conservation de l'énergie ;
- exprimant la conservation de la quantité de mouvement.

2. Les *équations d'état*, afin de caractériser les équilibres entre les phases. Quoi qu'il en soit, un système est ou se dirige toujours vers l'*équilibre*. L'équilibre du système est caractérisé par des variables d'état. Pour les phénomènes courants du génie chimique, ce sont des variables comme la température, la pression, les compositions qui déterminent et fixent l'état du système en équilibre. Lorsqu'une quelconque de ces variables change, l'état du système change, l'équilibre change et s'accommode. Puisque tous les systèmes physico-chimiques obéissent à un équilibre qui est fonction des variables d'état, celles-ci sont reliées entre elles dans des expressions qui traduisent l'état d'équilibre et qu'on appelle équations d'état. Les équilibres peuvent être de deux types, à savoir :

- chimique, les énergies mises en jeu sont grandes car il s'agit de modifier des matières ;
- physique, les énergies mises en jeu sont moins importantes car la matière n'est pas modifiée.

3. Les *lois cinétiques*, afin de rendre compte des vitesses de réalisation des phénomènes lors des transferts de matière ou de chaleur. Il est nécessaire d'acquérir les données cinétiques (le potentiel de transfert) des mécanismes limitants, qui imposeront leur allure et entraîneront le choix des appareils et de leurs dimensions, donc celui des *temps de séjour*.

Ces lois doivent être appliquées aux processus en distinguant aussi :

- s'il s'agit de phénomènes *stationnaires*, permanents, ne variant pas au cours du temps ou de phénomènes *transitoires*, en mouvement, variant avec le temps ;
- s'il s'agit de *transferts simples* ou de *transferts simultanés*, seulement un transfert de chaleur ou de matière ou de quantité de mouvement ou un mélange des précédents ;
- s'il s'agit de systèmes à une ou plusieurs phases, c'est-à-dire si ce sont des *systèmes homogènes* ou des *systèmes hétérogènes*.

2.6 Étage théorique

Dans le cas d'opérations unitaires de séparation, l'organe élémentaire d'échange est l'« étage » ou « plateau », élément technologique fondamental qui a pour fonction de mettre en contact les phases afin de provoquer des transferts de matière, de les mélanger initialement jusqu'à l'obtention d'un état proche de l'équilibre (figure 2.2).

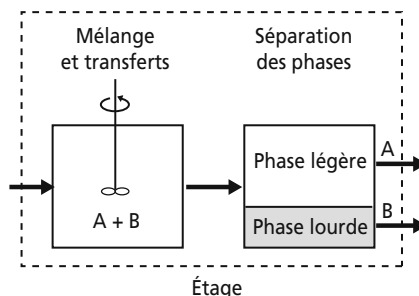


Figure 2.2 – Représentation schématique d'un étage.

Le fonctionnement réel des étages est très complexe. On l'approche cependant avec une précision acceptable par le modèle de *étage théorique* ou *idéal*, offrant ainsi une efficacité de 100 %.

Un étage idéal assure deux fonctions essentielles :

- les phases effluentes sont en équilibre thermodynamique ;
- la séparation physique (désengagement) des deux phases effluentes est parfaite, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'entraînement mécanique d'une phase dans l'autre.

L'intérêt fondamental de ce modèle est de donner la possibilité de dimensionner un appareil sans avoir recours ni à des données cinétiques (équilibre thermodynamique atteint), ni à des données relatives aux écoulements : l'absence d'entraînement ainsi que de transport de matière entre les étages permet de donner aux relations de bilan interétage (relations opératoires) une forme particulièrement simple.

Ses inconvénients sont liés aux hypothèses ; on détermine un nombre d'étages idéaux mais, de par la nature du modèle, on ne peut donner aucune indication sur les points suivants :

- relation entre le nombre d'étages théoriques et le nombre d'étages réels ;
- dimensionnement des étages réels.

Ces points ne peuvent être précisés qu'en recourant soit aux règles de l'art, soit à des modèles moins simples (cas des opérations compartimentées non idéales).

Toutefois, appuyé sur l'extrapolation raisonnée des installations existantes, ce modèle permet une estimation souvent précise du dimensionnement des appareils à compartiments séparés. Il est universellement employé pour les études d'avant-projet.

Un étage, même parfait, assure rarement à lui seul l'enrichissement désiré. Pour cette raison, habituellement, une série d'étages est employée, la variation de concentration étant d'autant plus importante que le nombre d'étages est plus élevé.

L'efficacité d'une unité de séparation se caractérise par la notion de nombre équivalent d'étages théoriques NUT (*nombre d'unités de transfert*), grandeur « statique » adimensionnelle qui traduit la difficulté de séparation du mélange considéré, et par celle de HUT (*hauteur d'unité de transfert*), grandeur « dynamique » qui dépend de l'appareil utilisé et qui peut être évaluée expérimentalement ou calculée au moyen de bilans différentiels. La longueur ou la hauteur totale du séparateur s'écrit : $H_t = \text{NUT} \times \text{HUT}$.

2.7 Bilans

Les problèmes de génie chimique font généralement intervenir les principes de conservation de trois grandeurs physiques : matière (ou masse), énergie et quantité de mouvement. Les bilans systématiques sont essentiels pour le calcul des installations, mais aussi pour renseigner l'ingénieur sur la bonne marche d'un appareil (identification d'une fuite, vérification de l'obtention d'un régime permanent...). Les bilans peuvent concerner l'ensemble du système, ou porter sur un élément « différentiel »

d'échange ; ils peuvent être globaux, toute forme de matière étant alors confondue, ou encore relatifs à un produit donné.

Pour pouvoir effectuer un bilan, il faut définir les limites du système sur lequel on veut travailler. Puis on détermine les flux de matière (entrée, sortie) ainsi que les réactions (création, destruction). La somme de ces différents éléments donne le terme *accumulation* qui consiste en la variation (qui peut être nulle) de la quantité sur laquelle on effectue le bilan dans les limites définies du système (figure 2.3).

$$\text{Entrée} + \text{Création} - \text{Sortie} - \text{Destruction} = \text{Accumulation}$$

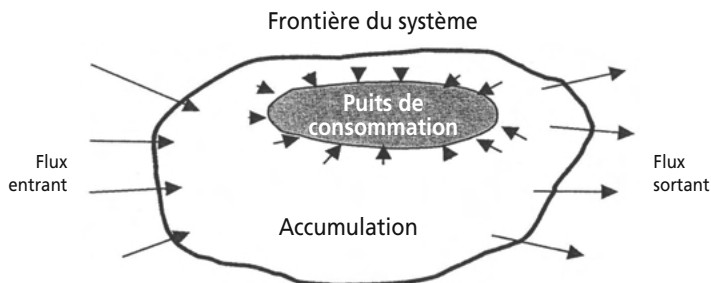


Figure 2.3 – Illustration de l'équation bilan.

Le bilan matière permet d'estimer la productivité et le rendement de l'opération, envisager ou non des recyclages, dimensionner les appareils à partir des productions souhaitées.

Le bilan d'enthalpie ou bilan thermique permet d'évaluer le coût énergétique de l'opération, choisir le procédé le mieux adapté et dimensionner les surfaces d'échange nécessaires.

3 • PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT

3.1 Considérations générales

Présent dans tous les domaines de la science et en ingénierie, le *phénomène de transport* (ou *phénomène de transfert*) est un processus irréversible durant lequel une grandeur physique est transportée par le biais de molécules. Tous les phénomènes de transport ont pour origine l'inhomogénéité d'une grandeur intensive. L'étude de chaque phénomène de transport se réfère à une certaine *entité (caractéristique) transférée*. Le moment, l'impulse ou la quantité de mouvement nécessaire pour augmenter la vitesse d'un fluide, la chaleur afin de vaporiser un liquide, la masse du liquide transportée dans une conduite ou celle des vapeurs diffusant dans un gaz constituent des exemples d'entités transportables dans les procédés de génie chimique. Il est donc nécessaire que l'entité transférée soit accumulée ou soit débitée en continu (toujours par un processus de transfert) vers le point initial du transport.

L'entité transférée est transportée par les *porteurs de charge*, lesquels ont la capacité de prendre en charge une certaine quantité à transporter, la faire déplacer et la décharger au point final du transport ou vers un point intermédiaire situé en chemin. Dans les procédés utilisés par l'ingénierie chimique on trouve les types de porteurs suivants :

- **porteurs de type radiant** : (ou photons quanta d'énergie électromagnétique) ;
- **porteurs de type par diffusion** : molécules, atomes, ions, électrons ;
- **porteurs de type par convection** : associations de molécules, volume fini de liquide, tourbillon.

Parmi les propriétés caractéristiques présentées par les porteurs on s'intéresse à :

- la grandeur de la charge transportée par chaque porteur ;
- le flux des porteurs (débit par unité de surface) ;
- la mobilité des porteurs (vitesse momentanée et vitesse moyenne) ;
- le libre parcours moyen, étant donné que le mouvement des porteurs ne représente que de segments du chemin à parcourir.

Le transport de l'entité transférée ou de la caractéristique devient possible uniquement s'il y a une chute d'énergie disponible d'un niveau plus haut vers un niveau plus bas, c'est-à-dire lorsque le transport est accompagné par une *chute de potentiel*, dont le gradient détermine la vitesse du transport en chaque point.

La différence de potentiel, appelée aussi *grandeur agissante*, ou – improprement – *force motrice*, caractérise chaque type de transport, par exemple :

- **différence de tension** pour le transport de l'électricité ;
- **différence de pression** pour le transport hydraulique ou pneumatique ;
- **différence de vitesse** pour le transport de moment ;
- **différence de température** pour le transfert thermique ;
- **différence de concentration** pour le transfert de matière.

La tendance naturelle du transport est de suivre la ligne ayant la plus forte pente du champ potentiel. Cependant, les porteurs ne choisissent toujours pas le chemin le plus court entre les points extrêmes ; le long de la « route », il peut survenir bien d'accidents à cause des obstacles : chocs, déviations, retours, coalescence, entraînement.

L'influence du milieu sur le transport est déterminée par une caractéristique globale de comportement appelée *conductivité*.

La loi fondamentale du transport dans une direction x s'exprime par la relation :

$$\partial E / \partial t = - \chi \partial \Pi / \partial x \quad (3.1)$$

qui contient la plupart des éléments communs, spécifiques du transport. Le signe négatif illustre le fait que le transfert s'effectue dans le sens des potentiels décroissants. Peut ainsi représenter une concentration de

matière, une enthalpie volumique ou une quantité de mouvement rapportée à l'unité de volume. Dans cette relation :

- ∂E – la quantité d'entité transférée ;
- $\partial E/\partial t$ – le flux d'entité transférée ;
- χ – la conductivité du milieu ;
- $\partial \Pi$ – la chute de potentiel ;
- ∂x – segment d'itinéraire ;
- $\partial \Pi/\partial x$ – le gradient de la chute de potentiel.

Selon les différentes caractéristiques (entités) transportées, la loi fondamentale (4.1) devient :

- la *loi de Fick* – exprime le débit de matière transférée par unité de volume :

$$dm/dt = k_1.a.\Delta C$$

- la *loi de Fourier* – donne la quantité de chaleur traversant la surface S :

$$dQ/dt = k_s.S\Delta T$$

- la *loi de Newton* exprime la quantité de mouvement transférée à travers la surface S :

$$d(m.w)/dt = k.S.\Delta w$$

Les transferts de chaleur se rencontrent partout dans l'industrie, surtout là où la récupération thermique est considérée comme une économie d'exploitation. C'est encore plus vrai dans l'industrie chimique où les réactions sont naturellement accompagnées de dégagement ou d'absorption de chaleur.

Les transferts de matière et de quantité de mouvement sont, eux, plus spécifiques de l'industrie chimique : c'est le cas de l'extraction par solvants ou de l'échange d'ions pour les premiers ; de la filtration, de la décantation ou de la centrifugation pour les seconds.

Mais ces transferts sont souvent complexes et beaucoup d'opérations unitaires (la distillation par exemple ou le séchage), qui reposent sur des équilibres entre phases, sont caractérisées par un transfert simultané de chaleur et de matière. Elles peuvent aussi être accompagnées de transferts de quantité de mouvement dus, entre autres, à l'agitation artificielle des fluides.