

Henri Fauduet

Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique

Aspects théoriques et pratiques

2^e édition



Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique

Aspects théoriques et pratiques

2^e édition

Henri Fauduet



www.editions.lavoisier.fr

Chez le même éditeur

Sécurité des procédés chimiques : connaissances et méthodes d'analyse des risques
Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy
A. Laurent, 2^e édition, 2011

Cinétique et catalyse
Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy
G. Scacchi G., M. Bouchy, J.-F. Foucaut,
O. Zahraa, R. Fournet, 2^e édition, 2011

Mécanique des fluides et des solides appliquée à la chimie
H. Fauduet, 2011

Chimie analytique et équilibres ioniques
J.-L. Burgot, 2^e édition, 2011

Chimie analytique en solution : principes et applications
J.-L. Brisset, A. Addou, M. Draoui,
D. Moussa, F. Abdelmalek, 2^e édition, 2011

Introduction au génie des procédés
D. Ronze, 2008

Le génie chimique à l'usage des chimistes
J. Lieto, 2^e édition, 2004

Commande des procédés
Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy
J.-P. Corriou, 2^e édition, 2003

Pervaporation
Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy
J. Néel, 1997

Génie de la réaction chimique
J. Villermaux, 2^e édition, 1933

Éléments de génie électrochimique
Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy
F. Coeuret, A. Storck, 2^e édition, 1993

Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique
Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy
N. Midoux, 1993

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc

Édition : Élodie Lecoquerre

Fabrication : Estelle Perez

Couverture : Delphine Guéchet

Composition : Atelier SMB

Impression : EMD, Lassy-les-Châteaux

Illustration de couverture : © Pline, Usine chimique Solvay de Tavaux,
Abergement-la-Ronce, Jura, Franche-Comté, France.

1^{re} édition, 1997

À la mémoire de André Étienne

*Professeur titulaire de la chaire de Chimie industrielle du
Conservatoire National des Arts et Métiers de 1955 à 1980*

Préface de la première édition

Comme dans d'autres domaines, ce sont les découvertes faites depuis deux siècles par des médecins, des chimistes, des ingénieurs, des physiciens, qui ont permis le développement de la Chimie, à la fois comme science exacte et comme activité industrielle.

On a ainsi construit des ateliers, des usines, puis des plateformes regroupant sur un même site des filières d'ateliers de production. Lorsque la chimie prend ainsi un caractère utilitaire on lui donne le nom de Chimie Industrielle.

Henry Le Chatelier, au début de ce siècle, définissait ainsi le mot « industrie » :
« Son objet essentiel est la transformation des objets et des énergies naturelles pour les amener à un état mieux adapté à nos besoins. »

On peut reprendre cette définition en la transposant, et écrire : *« La Chimie Industrielle a pour objet la fabrication, dans des conditions économiquement et socialement satisfaisantes, des produits chimiques qui répondent aux besoins de l'homme ».*

Il s'agit en effet d'une industrie de transformation. Le terme de « produit chimique » indique que l'on modifie non seulement la forme (c'est le cas de l'industrie mécanique) mais la nature même des corps par réaction chimique ; c'est d'ailleurs la principale activité capable de produire des matériaux non disponibles dans la nature.

La définition souligne que nous nous intéressons aux problèmes de fabrication : conception, calcul, technologie des appareils, construction et fonctionnement des unités. C'est le domaine du Génie Chimique. Enfin le caractère économique et social rattache la Chimie Industrielle aux sciences humaines : citons l'impératif du prix de revient — qui aiguillonne la concurrence —, mais aussi les problèmes d'hygiène, de sécurité, d'environnement. On voit que la Chimie Industrielle couvre un champ de connaissances très vaste. De cet ensemble, fort varié voire hétéroclite, ce qui relève de la fabrication : conception, calcul, technologie des appareils, constructions et fonctionnement des unités, nous semble d'une importance capitale.

Ayant remarqué que l'on trouvait, dans des fabrications diverses, les mêmes procédés de séparation, les chimistes ont créé, au début de ce siècle, le concept d'opération unitaire et développé une nouvelle discipline : le Génie Chimique, qui leur permet de définir, d'extrapoler, de dimensionner les appareils puis l'ensemble des

procédés chimiques. Depuis quelques années, il est apparu que les problèmes rencontrés dans les autres industries de transformation : problèmes de séparation, de modélisation, de conduite, de transfert... pouvaient être traités par les méthodes du Génie Chimique.

C'est ainsi que nous assistons à la naissance du « Génie des Procédés » qui serait constitué de « l'ensemble des connaissances relatives à la conception et à la mise en œuvre des procédés industriels de transformation de la matière ». On voit l'importance qu'il convient d'accorder au Génie Chimique et à son extension au Génie des Procédés.

C'est donc fort judicieusement que Monsieur Fauduet nous propose un ouvrage intitulé « Principes Fondamentaux du Génie des Procédés et de la Technologie Chimique ».

Très logiquement la première partie de l'ouvrage, après un court chapitre dédié aux conversions d'unités (véritable « pont aux ânes » pour beaucoup de chimistes) est un rappel des notions essentielles concernant les bilans de matière et d'énergie.

La seconde partie est une somme de problèmes, application directe de sujets traités précédemment. Les solutions proposées sont très détaillées et rédigées avec beaucoup de soin.

Enfin la troisième partie traite des expérimentations menées sur des pilotes et constitue la véritable originalité du livre. Pour chaque expérimentation, l'auteur donne les expressions mathématiques des bilans, une description du matériel utilisé et ensuite les résultats moyens de mesures et leur interprétation.

On trouve dans les annexes : les symboles graphiques utilisés, les principaux facteurs de conversion, les constantes physiques de quelques composés et de mélanges.

Les exposés sont facilement compréhensibles et l'ensemble représente un bel effort de synthèse.

Tel qu'il est conçu cet ouvrage doit rendre de grands services aux techniciens chimistes qu'ils soient en cours d'études ou en activité.

La partie traitant des expérimentations, la plus élaborée, est directement exploitable par des enseignants ou des chimistes travaillant sur des pilotes.

On ne pouvait penser à une personne mieux qualifiée que M. Fauduet pour rédiger un tel livre. Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers, Docteur-Ingénieur, ingénieur dans l'industrie privée puis ingénieur au Centre de Documentation de l'Armement, monsieur Fauduet a été nommé Maître de Conférences à l'Université d'Orléans où il a organisé et développé la halle de Génie Chimique de l'Institut Universitaire de Technologie. Il dirige aujourd'hui l'enseignement technologique de Productique Chimique dans cet Institut.

Fruit d'une longue expérience, on peut prédire que cet ouvrage sera bien accueilli par les étudiants, les professeurs et les enseignants ayant à traiter des problèmes de Chimie Industrielle et de Génie des Procédés.

B. Lefrançois

Professeur Titulaire de la Chaire de Chimie Industrielle
du Conservatoire National des Arts et Métiers (1996)

Avant-propos de la première édition

Cet ouvrage répond à la volonté d'offrir un document de base pour les futurs chimistes qui se destinent aux carrières technologiques et particulièrement aux niveaux 3 (IUT, STS). Il s'adresse également aux chimistes en activité sans pour autant leur permettre de satisfaire totalement leurs besoins.

L'étude des opérations unitaires de l'industrie chimique exige la connaissance de certains principes fondamentaux de physique, de mécanique et de chimie qui sont à la base du génie des procédés et de la technologie chimique. Bien que cette science, née de la chimie pétrolière, se soit considérablement élargie aux autres industries de transformation, les principes généraux restent les mêmes. L'objectif de cet ouvrage est de permettre d'acquérir la maîtrise des calculs relatifs aux bilans massiques et énergétiques qui sont à la base de tous les problèmes rencontrés, tant en génie des procédés qu'en chimie industrielle.

Avant d'étudier ces notions fondamentales, il est indispensable de replacer le génie des procédés et la technologie chimique dans son contexte industriel en définissant la stratégie à utiliser pour développer un procédé ou une molécule ainsi que les divers opérations et matériels nécessaires à la mise en œuvre de la fabrication (préparation des réactifs, production de la molécule, séparation et purification des produits finis).

Il a été jugé utile de rappeler les diverses grandeurs physicochimiques utilisées en génie des procédés (définitions, équations aux dimensions, unités) avant d'étudier les bilans-matière et les bilans énergétiques. Une partie des aspects théoriques réactualise l'ouvrage d'André Étienne sur les procédés fondamentaux de chimie industrielle publié en 1963.

Il a semblé également indispensable d'illustrer le cours, toujours trop abstrait, par des exercices d'application mais aussi par des problèmes de synthèse pour que l'étudiant puisse s'initier à la méthodologie et s'assurer de savoir formuler et résoudre simplement un problème relatif au génie des procédés et/ou à la chimie industrielle.

Le génie des procédés est, comme toutes les autres disciplines chimiques, une science expérimentale, c'est-à-dire une science qui ne progresse qu'après vérification des hypothèses par des mesures réalisées en grandeur significative. C'est

pourquoi, il était important de terminer cet ouvrage par une partie expérimentale. Les résultats, obtenus par les étudiants dans le cadre de travaux pratiques, ne permettent pas toujours de corroborer, aussi parfaitement que le souhaiterait le lecteur, les deux lois fondamentales à la base du génie des procédés (conservation de la masse et conservation de l'énergie). Ces écarts viennent des erreurs expérimentales (erreurs régulières, périodiques, organisées et aléatoires) inévitables, surtout avec des opérateurs successifs non familiarisés avec ces techniques. Toutefois, il est bien connu que même les méthodes modernes de mesure ne peuvent pas éliminer totalement ces erreurs et que certains résultats expérimentaux ne permettent pas de conclure une étude de façon satisfaisante parce que l'influence de certains paramètres n'a pas pu être totalement maîtrisée.

Ce dernier propos est relativement encourageant puisque l'intervention humaine reste primordiale dans l'avancement de la méthode et de la technique et ce sont précisément les étudiants d'aujourd'hui qui seront chargés de faire évoluer la technologie de demain.

Il aurait été présomptueux de vouloir rédiger seul cet ouvrage. Il était donc naturel de vouloir y associer mes collègues qui ont accepté de me faire bénéficier de leurs connaissances et notamment :

- Stéphane Bostyn, Maître de Conférences à l'IUT d'Orléans ;
- Alain Delacroix, Professeur des Universités, chaire de chimie industrielle du Cnam de Paris ;
- Bernard Gourgousse, Professeur certifié au Centre de Ressources de Génie Chimique de l'Académie d'Orléans-Tours ;
- Catherine Porte, Maître de Conférences, chaire de chimie industrielle du Cnam de Paris.

Tous ces collaborateurs, issus d'horizons divers et enseignant le génie des procédés à des niveaux différents, ont participé activement à cette rédaction en apportant leur savoir et leur expérience pour proposer des modifications pertinentes dans le cours et les problèmes, et une interprétation plus fine des résultats expérimentaux. Qu'ils en soient tous chaleureusement remerciés.

Monsieur Bernard Lefrançois, Professeur titulaire de la chaire de chimie industrielle du Conservatoire National des Arts et Métiers, m'a fait l'honneur de bien vouloir préfacier cet ouvrage et je tiens à lui adresser mes plus vifs remerciements.

Le Professeur Alain Delacroix est à l'origine de la rédaction de ce manuel. Je tiens à le remercier chaleureusement pour ses précieux conseils et ses nombreux encouragements.

Enfin, je ne saurais oublier Jean-Pierre Coïc, Directeur de l'IUT d'Orléans qui m'a accueilli dans son établissement. Je lui suis infiniment reconnaissant de tous les efforts qu'il consacre au développement de l'enseignement et de la recherche technologique et l'assure de mon amitié.

Henri Fauduet

Avant-propos de la seconde édition

L'édition d'un livre apporte une grande fierté à son auteur. Un nombre considérable d'heures ont été consacrées à réfléchir sur les connaissances indispensables à l'acquisition et la maîtrise d'une discipline, à trouver des informations pour illustrer ses propos, à faire partager le fruit de sa propre expérience en dispensant des messages clairs et simples, à vouloir inculquer une méthodologie précise, à lire et relire son texte pour en améliorer son fonds et sa forme. Malheureusement, cette période euphorique est de courte durée et les défauts de « son œuvre » apparaissent rapidement. Même sans parler des inévitables « coquilles » qui survivent aux diverses relectures de l'auteur et de ses collaborateurs, d'autres imperfections deviennent évidentes ; ce manuel que vous vouliez synthétique mais complet présente des lacunes, des normes sont en train de changer, certains concepts n'ont pas été abordés, etc. La seconde édition devrait permettre de corriger en partie les insuffisances tout en réactualisant les données de la première édition.

Indépendamment des modifications et compléments apportés à la première édition, il a semblé indispensable de compléter les notions fondamentales (grandeurs, bilans de matière et d'énergie) par des éléments de thermodynamique et de cinétique. La thermodynamique, la cinétique ainsi que les lois sur les équilibres physiques et chimiques sont nécessaires pour appréhender la faisabilité ainsi que les évolutions chimiques et thermiques d'un procédé. Elles représentent les bases qui doivent être acquises et qui sont utilisées quotidiennement par les ingénieurs et les techniciens travaillant dans l'industrie chimique. Il était aussi important d'ajouter à ces concepts théoriques des notions sur les réacteurs et présenter les fondements de la qualité, de la sécurité et des techniques permettant de préserver l'environnement. En effet, le chimiste évoluant dans le milieu industriel utilise sans cesse, pour les transformations chimiques ou les séparations physiques, divers réacteurs dont il doit assurer la maîtrise. Il est aussi appelé à gérer la qualité des produits qu'il fabrique et qui seront commercialisés. Il doit également veiller à ce que les fabrications soient effectuées dans des conditions satisfaisantes de sécurité et que l'environnement soit préservé. Il était donc naturel d'inclure toutes ces notions pratiques dans les principes fondamentaux.

Ce livre a été conçu essentiellement pour la formation de néophytes. Il est donc conseillé que ce public commence par la lecture de la première partie pour qu'il s'imprègne des connaissances de base indispensables à la mise en œuvre industrielle d'un procédé : faisabilité thermodynamique, bilans de matière et d'énergie, cinétique appliquée au calcul et au choix de réacteurs mais aussi aux principes de base de la sécurité, de la préservation de l'environnement et de la qualité. Il pourra ensuite vérifier ses acquis et exploiter ses résultats en utilisant les méthodologies décrites dans la deuxième et la troisième partie. Lorsqu'il sera plus chevronné, il pourra utiliser l'abondante littérature spécialisée disponible sur ces sujets.

Il était bien sûr nécessaire de s'assurer du concours de collègues bienveillants qui ont apporté leurs connaissances et leur rigueur à l'élaboration de cet ouvrage. Je remercie vivement tous ces collègues, issus des milieux universitaire et industriel, qui ont bien voulu consacré du temps à la lecture et à la correction de certaines parties de cette seconde édition. Je les remercie aussi d'avoir échangé, longuement parfois, pour mieux faire passer certains messages et améliorer la qualité du manuel. Cette confrontation est indispensable. Je remercie particulièrement mes collègues universitaires :

- Stéphane Bostyn et Olivier Chedeville, maîtres de conférences à l'IUT d'Orléans ;
- Jean-Louis Havet, maître de conférences au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris ;
- Bernard Gourgousse, professeur agrégé de chimie au Centre de Ressources de Génie Chimique de l'Académie d'Orléans-Tours.

Il était aussi important d'avoir l'avis de professionnels issus du tissu industriel orléanais et enseignants-vacataires à l'IUT d'Orléans. Ils ont apporté chacun leur contribution dans leur domaine de prédilection. Je remercie chaleureusement :

- Daniel Le Goix, consultant et professeur associé ;
- Michel Rondeau, ingénieur responsable qualité, environnement, hygiène, sécurité chez Orrion Chemicals Orgaform à Semoy ;
- Philippe Treillard, ingénieur responsable de production chez Orgapharm (groupe Axyntis) à Pithiviers ;
- Sébastien Saint-Chély, ingénieur et conseiller en environnement à la Chambre de Commerce et d'Industrie Territoriale du Loiret à Orléans.

Je remercie de nouveau mes collègues Alain Delacroix, professeur titulaire de chaire et Catherine Porte, professeur des universités, enseignants à la chaire de chimie industrielle – génie des procédés du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris pour leurs encouragements et leur participation active à la première édition de cet ouvrage.

Des données ont été extraites de la thèse de Catherine Couriol, actuellement maître de conférences à l'IUT de Rennes, pour élaborer des exercices et expérimentations. Je la remercie de m'avoir permis d'utiliser ces données dans ce manuel.

Symboles et abréviations

Les symboles utilisés dans cet ouvrage sont indiqués ci-après selon les alphabets latin et grec et sont suivis de leur signification et de l'unité dans le système légal.

Alphabet latin

<i>A</i>	masse ou quantité de matière (débit massique ou molaire) de l'alimentation (kg/kmol ou kg.h ⁻¹ /kmol.h ⁻¹)
<i>A</i>	surface (m ²)
<i>a</i>	accélération (m.s ⁻²)
<i>a</i>	activité d'un composé (sans unité)
<i>a</i>	constante (variable)
<i>a</i>	longueur d'un côté (m)
<i>B</i>	masse ou quantité de matière (débit massique ou molaire) du résidu (kg/kmol ou kg.h ⁻¹ /kmol.h ⁻¹)
<i>b</i>	largeur (m)
<i>C, c</i>	capacité thermique molaire (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹) et massique (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)
<i>C</i>	concentration molaire (mol.m ⁻³)
<i>c</i>	célérité (m.s ⁻¹)
<i>c</i>	concentration massique (kg.m ⁻³)
<i>c</i>	nombre de composants (sans unité)
<i>C_i</i>	concentration du composé <i>i</i> au cours du temps <i>t</i> (mol.m ⁻³)
<i>C_p</i> et <i>C_v</i>	capacités thermiques molaires à pression constante et à volume constant (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
<i>c_p</i> et <i>c_v</i>	capacités thermiques massiques à pression constante et à volume constant (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
<i>C_R⁰</i>	concentration initiale du réactif (mol.m ⁻³)

D, d	diamètre, épaisseur (m)
D	masse ou quantité de matière (débit massique ou molaire) du distillat (kg/kmol ou kg.h ⁻¹ /kmol.h ⁻¹)
d	densité (sans unité)
$dp, dT, dV, d\rho$	variation de pression (Pa), de température (K), de volume (m ³), de masse volumique (kg.m ⁻³)
E	énergie, travail (J)
E	force électromotrice (V)
e	épaisseur ou largeur (m)
E_a	énergie d'activation (J.mol ⁻¹)
E_c	énergie cinétique (J)
E_p	énergie potentielle (J)
F	constante de Faraday ($F = 96\,487\text{ C}$)
F	énergie libre (J.mol ⁻¹)
F	force (N)
f	fréquence (Hz ou s ⁻¹)
f	fugacité (Pa)
G	débit massique du fluide caloporteur (kg.h ⁻¹)
G	débit massique surfacique, $G = \rho u$ (kg.m ⁻² .s ⁻¹)
G	enthalpie libre (J.mol ⁻¹)
g	accélération de la pesanteur ($g = 9,81\text{ m.s}^{-2}$)
G°	enthalpie libre standard (J.mol ⁻¹)
G_f°	enthalpie libre standard de formation (J.mol ⁻¹)
G_r	enthalpie libre d'une réaction (J.mol ⁻¹)
H	enthalpie (J)
H	enthalpie sensible de la phase vapeur (J)
H	hauteur (m)
\mathcal{H}	constante de Henry (Pa)
h	enthalpie sensible de la phase liquide (J)
h_c	coefficient de convection (W.m ⁻² .K ⁻¹)
H_s	enthalpie sensible (J)
K	constante d'équilibre (variable)
k	coefficient de conductivité (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
k	constante de vitesse (variable)
k	constante quelconque (variable)
K_a	constante d'équilibre par rapport aux activités (variable)
K_c	constante d'équilibre par rapport aux concentrations (variable)
k_c	coefficient de partage (sans unité)

K_f	constante d'équilibre par rapport aux enthalpies de formation (variable)
K_n	constante d'équilibre par rapport aux quantités de matière (variable)
K_p	constante d'équilibre par rapport aux pressions (variable)
K_r	constante d'équilibre de réaction (variable)
K_v	coefficient de volatilité absolue (sans unité)
K_y	constante d'équilibre par rapport aux titres molaires (variable)
K_V	constante d'équilibre par rapport aux coefficients de fugacité (variable)
K_Φ	constante d'équilibre par rapport aux fugacités (variable)
k_0	facteur pré-exponentiel (variable)
L	débit massique (molaire) du concentrat (kg.h^{-1} ou kmol.h^{-1})
L	débit massique (molaire) de la solution ou du raffinat (kg.h^{-1} ou kmol.h^{-1})
L	enthalpie molaire (J.mol^{-1})
L, l	longueur quelconque (m)
l	enthalpie massique (J.kg^{-1})
L_f, l_f	enthalpie molaire et massique de fusion (J.mol^{-1} ou J.kg^{-1})
L_R	masse (débit massique) du reflux dans la colonne (kg ou kg.s^{-1})
L_v, l_v	enthalpie molaire et massique de vaporisation (J.mol^{-1} ou J.kg^{-1})
M	masse molaire (g.mol^{-1})
\overline{M}	masse molaire moyenne (g.mol^{-1})
m	masse (kg)
m_B	molalité (mol.kg^{-1})
N	normalité (mol.L^{-1})
n	quantité de matière, nombre de moles (mol)
n_A^0	nombre de moles initial du réactif A (mol)
n_i^0	nombre total de moles actives dans l'état de référence (mol)
P	puissance (W)
p	pression (Pa)
p_a	pression absolue (Pa)
p_{atm}	pression atmosphérique (Pa)
p_{cr}	pression critique (Pa)
P_i	débit net de production du composé i (mol.s^{-1})
p_r	pression réduite (Pa)
p_r	pression relative (Pa)
p°	pression (tension) de vapeur du liquide à la température considérée (Pa)
p_0	pression prise dans les conditions normales de température et de pression (Pa)
Q, q	quantité de chaleur (J)

Q	quantité d'électricité (C avec $1 \text{ C} = 1 \text{ A.s}$)
q_{iE}	débit molaire du produit i à l'entrée du réacteur (mol.s^{-1})
q_{iS}	débit molaire du produit i à la sortie du réacteur (mol.s^{-1})
q_m	débit massique (kg.s^{-1})
q_m	enthalpie molaire de dissolution (en mol de solution) (mol.mol^{-1})
q_n	débit molaire (mol.s^{-1})
Q_p	énergie interne à pression constante (J)
Q_v	énergie interne à volume constant (J)
q_v	débit volumique ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
R	constante des gaz parfaits ($R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
R, r	rayon (m)
R	taux de reflux (sans dimension)
r	vitesse d'une réaction ($\text{mol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$)
R_r	rapport des réactifs (sans unité)
S	entropie ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
S	surface (m^2)
s	distance curviligne quelconque entre deux points (m)
s	solubilité d'un composé (g/100 g de solvant)
S°	entropie libre standard ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
T	période (s)
T, T_K	température absolue (K)
t	température relative ($^\circ\text{C}$)
t	temps (s)
T_{cr}	température critique (K)
T_e	température d'ébullition (K)
T_f	température de fusion (K)
t_f	température Fahrenheit ($^\circ\text{F}$)
t_p	temps de passage (s)
T_R	température Rankine ($^\circ\text{R}$)
T_r	température réduite (K)
t_s	temps de séjour (s)
T_0	température prise dans les conditions normales de température et de pression (K)
U	énergie interne (J)
u	vitesse de déplacement (m.s^{-1})
u_s	vitesse spatiale volumique (mol.m^{-3})
V	différence de potentiel (V)

V	masse ou quantité de matière (débit massique ou molaire) de la phase vapeur (kg/kmol ou $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}/\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$)
V	débit massique ou molaire d'évaporat ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ou $\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$)
V	débit massique ou molaire de solvant ou d'extrait ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ou $\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$)
V	volume d'une phase (m^3)
v	variance d'un système (sans unité)
v	vitesse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
v	volume massique ($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)
V_{cr}	volume critique (m^3)
V_m	volume molaire ($\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
V_R	volume du réacteur (m^3)
V_r	volume réduit (m^3)
V_0	volume pris dans les conditions normales de température et de pression (m^3)
W	travail, énergie (J)
w	titre massique (sans unité)
w	vitesse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
W_e	énergie électrique (J)
W_{ec}	énergie électrochimique (J)
W_m	énergie mécanique (J)
W_p	énergie de compression (J)
x	taux de transformation (de conversion) (sans unité)
x	titre molaire (dans la phase liquide) (sans unité)
x_e	taux de transformation à l'équilibre (sans unité)
y	titre molaire (dans la phase vapeur) (sans unité)
Z	facteur de compressibilité (sans dimension)
z	distance (m)
z	nombre de charges d'un ion (sans dimension)

Alphabet grec

α	angle (sans dimension)
α	coefficient de dilatation à pression constante (K^{-1})
α	coefficient de volatilité relative (sans dimension)
β	angle plan (sans dimension)
β	coefficient d'augmentation de pression (K^{-1} , $^{\circ}\text{C}^{-1}$)
γ	coefficient d'activité (sans dimension)
γ	facteur isentropique, $\gamma = C_p/C_v$ (sans dimension)

δ	épaisseur (m)
ΔF	variation d'énergie libre (J.mol ⁻¹)
ΔG	variation d'enthalpie libre (J.mol ⁻¹)
ΔH	variation d'enthalpie (J)
Δh	variation de hauteur (m)
ΔH_c^0	variation d'enthalpie de combustion (J)
ΔH_f	variation d'enthalpie molaire de fusion (J)
ΔH_f^0	variation d'enthalpie de formation (J)
ΔH_m	variation d'enthalpie de dissolution (dilution infinie) (J)
ΔH_r^0	variation d'enthalpie standard de réaction (J)
ΔH_s	variation d'enthalpie sensible (J)
ΔH_{sub}	variation d'enthalpie molaire de sublimation (J)
ΔH_v	variation d'enthalpie molaire de vaporisation (J)
ΔH_{vap}	enthalpie apportée par la vapeur de chauffe (J.kg ⁻¹)
Δn	variation de la quantité de matière (mol)
Δp	variation de pression (perte de charge) (Pa)
δQ	variation de quantité de chaleur (J)
ΔS	variation d'entropie (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
ΔU	variation d'énergie interne (J.mol ⁻¹)
ΔV	variation de volume (m ³)
δW	variation de travail (J)
η	rendement ou efficacité (sans dimension)
η	viscosité dynamique (Pa.s)
θ, θ_c	température relative (°C)
μ	potentiel chimique (J.mol ⁻¹)
μ	viscosité dynamique (Pa.s)
ν	coefficient de fugacité (sans dimension)
ν	coefficient stœchiométrique (sans dimension)
ν	fréquence (Hz ou s ⁻¹)
ν	viscosité cinématique (en m ² .s ⁻¹)
π	rapport du périmètre d'un cercle à son diamètre ($\pi = 3,1416$)
ρ	masse volumique (kg.m ⁻³)
$\bar{\rho}$	masse volumique moyenne (kg.m ⁻³)
ρ_a	masse volumique apparente (kg.m ⁻³)
ρ_{cr}	masse volumique critique (kg.m ⁻³)
ρ_r	masse volumique réduite (kg.m ⁻³)
ρ_v	masse volumique vraie (kg.m ⁻³)

ρ_0	masse volumique d'un corps de référence (kg.m^{-3})
τ	temps de demi-réaction (s)
τ_{at}	taux d'alimentation totale (sans dimension)
τ_c	taux de conversion (sans dimension)
τ_e	taux d'excès (sans dimension)
τ_r	taux de recyclage (sans dimension)
τ_s	sélectivité (sans dimension)
Φ	flux thermique (W)
Φ	titre volumique (sans dimension)
φ	nombre de phases
ω	vitesse angulaire (rad.s^{-1})
Ω, ω	angle solide d'un cône (sans dimension)

Indice

A	alimentation
a	absolu, appoint
a	alimentation en réactif d'appoint
acc	accumulé
app	apporté
atm	atmosphère
B	bouilleur
C	condenseur (condensation)
C	coproduit principal
c	chaud
chauf	chauffage
cr	critique
D	distillat
D	réactif principal (en défaut)
E	réactif secondaire (en excès)
e	entrée, équivalent
f	fonction
f	froid
i	constituant quelconque
j	constituant quelconque
L	concentrat
m, moy	moyen

P	produit principal
p	pression constante, produit
R, r	réactif
r	réduit, relatif, réaction
S	produit secondaire
s	sortie
T	température
t	température
V	vapeur, évaporat
v	volumétrique, volumique, volume constant
0	alimentation totale du réacteur
0	référence, initial
1	courant effluent du réacteur
2	courant contenant les produits
Σ	mélange, somme

Table des matières

Préface de la première édition	V
Avant-propos de la première édition	VII
Avant-propos de la seconde édition	IX
Symboles et abréviations	XI

Préambule

1. Introduction sur le génie des procédés et la technologie chimique	1
1.1. Définitions	1
1.2. Historique	2
1.3. Perspectives	3
2. Élaboration d'un produit	4
3. Génie des procédés, technologie chimique et chimie industrielle	5
3.1. Terminologie	5
3.2. Missions du « chimiste industriel »	6
3.3. Débouchés du « chimiste industriel »	7

Première partie

Notions théoriques sur le génie des procédés et la technologie chimique

Chapitre 1

Industrialisation des procédés chimiques

1. Diverses phases d'industrialisation d'un produit	11
1.1. Recherche exploratoire	11
1.2. Recherche du procédé en laboratoire	12
1.2.1. Étude chimique préliminaire	12

1.2.2.	Étude chimique approfondie	12
1.2.3.	Études économique et commerciale	13
1.3.	Développement du procédé et avant-projet industriel	13
1.3.1.	Construction ou utilisation d'une installation pilote	13
1.3.2.	Rédaction du projet industriel préliminaire ou avant-projet.	14
1.3.3.	Le projet industriel complet	15
1.3.4.	Le projet d'installation et de construction	15
1.4.	Construction et mise en route de l'atelier de production	15
2.	Divers types d'opérations chimiques	15
2.1.	Caractéristiques de l'industrie chimique	15
2.2.	Opération discontinue (système fermé)	17
2.3.	Opération continue (système à courants)	18
2.4.	Opération semi-continue (système ouvert)	19
3.	Opérations unitaires du génie des procédés	20
3.1.	Opérations purement mécaniques.	20
3.1.1.	Opérations mécaniques sur les fluides	20
3.1.2.	Opérations mécaniques sur les solides	21
3.1.3.	Opérations mécaniques de séparations solide-fluide	23
3.2.	Opérations de transfert de matière et/ou de chaleur entre phases	24
3.2.1.	Phases vapeur-liquide.	24
3.2.2.	Phases liquide-solide	25
3.2.3.	Phases vapeur-solide	26
3.2.4.	Phases liquide-liquide	27
3.3.	Opérations de transformation chimique et de transfert thermique.	27
3.3.1.	Réacteurs.	28
3.3.2.	Agitation.	28
3.3.3.	Échangeurs thermiques	29
3.3.4.	Production de chaleur et de froid.	29

Chapitre 2

Principales grandeurs physicochimiques utilisées en génie des procédés

1.	Notions générales sur les grandeurs physicochimiques	31
1.1.	Définition d'une grandeur	32
1.2.	Équation aux dimensions	34
1.2.1.	Finalité	34
1.2.2.	Exercices d'application.	34
1.3.	Les systèmes d'unités	35
1.3.1.	Le système international (SI)	36
1.3.2.	Le système CGS	36
1.3.3.	Le système anglo-saxon	36
1.3.4.	Autres systèmes	37

1.3.5. Exercices d'application sur les conversions d'unités.	38
2. Étude de quelques grandeurs physicochimiques.	39
2.1. Grandeurs générales d'espace et de temps.	39
2.1.1. Grandeurs géométriques d'espace	39
2.1.2. Grandeur de temps	41
2.1.3. Grandeurs mécaniques d'espace et de temps	42
2.2. Grandeurs mécaniques	43
2.2.1. Masse.	43
2.2.2. Grandeurs dérivées de la masse	43
2.2.3. Grandeurs de débit de matière	47
2.2.4. Force	48
2.2.5. Pression	48
2.2.6. Énergie	49
2.2.7. Puissance	50
2.2.8. Rendement	51
2.2.9. Viscosité.	51
2.3. Grandeurs thermodynamiques.	52
2.3.1. Température	52
2.3.2. Quantité de chaleur	53
2.3.3. Flux thermique	53
2.3.4. Capacités thermiques.	54
2.3.5. Enthalpies de changement d'état.	55
2.4. Grandeurs moléculaires et de composition.	56
2.4.1. Grandeurs des entités constituant la matière	56
2.4.2. Équivalent.	58
2.4.3. Grandeurs exprimant la composition d'un mélange	58
2.4.4. Molalité.	61
2.4.5. Masse molaire moyenne	61
2.4.6. Exercices d'application sur les grandeurs de composition.	61

Chapitre 3

Bilans-matière

1. Introduction.	68
1.1. Définition.	68
1.2. But	68
1.3. Principe de la conservation de la matière	68
1.4. Conséquences du principe de la conservation de la matière	70
1.4.1. Cas général	70
1.4.2. Processus physiques	70
1.4.3. Processus chimiques	71
1.4.4. Divers types de bilans-matière.	72
2. Caractéristiques d'une production	72
2.1. Schéma général de procédé et terminologie	73
2.2. Transformation des réactifs en produits	74

2.3.	Grandeurs caractéristiques	75
2.3.1.	Grandeurs concernant les réactifs	75
2.3.2.	Grandeurs concernant les réactifs et les produits	76
2.3.3.	Exemples d'applications	77
3.	Établissement des bilans-matière dans les procédés industriels	80
3.1.	Exemple de bilan sur la fabrication de l'acide sulfurique selon le procédé de contact	80
3.2.	Comment établir un bilan ?	81
3.2.1.	Faire un schéma simplifié du procédé	81
3.2.2.	Écrire l'équation de réaction	81
3.2.3.	Choisir une base de calcul	82
3.2.4.	Faire l'inventaire de toutes les données	82
3.2.5.	Détecter les grandeurs à calculer et les inconnues	82
3.2.6.	Construire un tableau récapitulatif	83
3.2.7.	Indiquer dans le tableau toutes les données de l'énoncé	83
3.2.8.	Faire les calculs nécessaires et compléter le tableau	83
3.3.	Quand faire un bilan ?	87
3.3.1.	Dilutions et préparations de mélanges binaires et ternaires	87
3.3.2.	Bilans-matière dans les opérations unitaires	88
3.3.3.	Bilans-matière dans les neutralisations	88
3.3.4.	Bilans-matière dans les productions chimiques	89

Chapitre 4

Bilans énergétiques

1.	Introduction	91
1.1.	Définition	91
1.2.	But	91
1.3.	Rappels de thermodynamique	92
1.3.1.	Principe zéro	92
1.3.2.	Premier principe	92
1.3.3.	Deuxième principe	93
1.3.4.	Troisième principe	93
1.3.5.	Loi de Hess	94
1.4.	Conventions de signes	95
2.	Principales formes d'énergie	96
2.1.	Énergies propres au système	96
2.1.1.	Énergie interne	96
2.1.2.	Énergie potentielle	97
2.1.3.	Énergie cinétique	97
2.2.	Énergies propres aux processus du système	98
2.2.1.	Travail	98
2.2.2.	Quantité de chaleur ou énergie thermique	99
3.	Effets thermiques en relation avec l'enthalpie	99
3.1.	Enthalpie	99

3.1.1.	Définition	99
3.1.2.	Enthalpie d'un processus continu stationnaire	100
3.1.3.	Enthalpie d'un processus discontinu à pression constante	100
3.2.	Effets thermiques liés aux phénomènes physiques.	100
3.2.1.	Enthalpie sensible.	100
3.2.2.	Capacités thermiques.	101
3.2.3.	Enthalpies de changement d'état.	109
3.2.4.	Enthalpie totale des substances pures	112
3.2.5.	Enthalpie des mélanges.	115
3.3.	Effets thermiques liés aux processus chimiques	118
3.3.1.	Notions sur les enthalpies de réaction	119
3.3.2.	Variation de l'enthalpie de réaction avec la température et la pression.	123
4.	Établissement des bilans thermiques dans les procédés industriels	134
4.1.	Conséquences du principe de la conservation de l'énergie	134
4.2.	Différents types de procédés	135
4.2.1.	Procédé isotherme	135
4.2.2.	Procédé isobare	136
4.2.3.	Procédé isométrique ou isochore	136
4.2.4.	Procédé adiabatique	136
4.2.5.	Procédé polytropique.	136
4.3.	Comment établir un bilan thermique ?	136
4.3.1.	Équation du bilan thermique	137
4.3.2.	Exemple de bilan thermique	137
4.3.3.	Stratégie	138

Chapitre 5

Équilibres physiques et chimiques

1.	État gazeux	146
1.1.	Gaz parfaits	147
1.1.1.	Lois générales sur les gaz purs.	147
1.1.2.	Lois des mélanges de gaz parfaits.	149
1.2.	Gaz réels	150
1.2.1.	Lois des états.	151
1.2.2.	Équations d'état	151
1.3.	Exercices d'application	153
2.	Équilibres physiques entre phases	156
2.1.	Systèmes à un seul constituant.	157
2.1.1.	Équilibre liquide-vapeur	158
2.1.2.	Équilibre solide-vapeur	161
2.1.3.	Équilibre solide-liquide	162
2.2.	Systèmes binaires	162
2.2.1.	Équilibre liquide-vapeur	162
2.2.2.	Équilibre solide-liquide	166

2.3.	Systèmes ternaires	167
2.3.1.	Équilibre liquide-gaz	167
2.3.2.	Équilibre liquide-liquide	168
2.4.	Exercices d'applications	169
3.	Équilibres chimiques statiques	172
3.1.	Introduction sur les réactions	172
3.2.	Classification des réactions	173
3.2.1.	Classification d'après le mode de déplacement des espèces	173
3.2.2.	Classification d'après la thermicité	174
3.2.3.	Classification d'après la nature des phases en présence	174
3.2.4.	Classification d'après l'unicité du processus	175
3.2.5.	Classification d'après la nature des réactifs	176
3.2.6.	Classification d'après le mode d'activation	177
3.3.	Équilibres chimiques statiques	178
3.3.1.	Généralités sur les équilibres chimiques statiques	178
3.3.2.	Notions théoriques sur l'équilibre chimique statique	179
3.3.3.	Énergie libre et enthalpie libre	183
3.3.4.	Étude spéciale de l'enthalpie libre	184
3.4.	Exercices d'applications	192
4.	Équilibres chimiques dynamiques	198
4.1.	Introduction	198
4.2.	Relations entre thermodynamique et cinétique	199
4.3.	Concepts de base	200
4.3.1.	Composition du milieu réactionnel	200
4.3.2.	Débit de transformation	200
4.3.3.	Notions sur la vitesse de réaction	201
4.3.4.	Ordre de réaction et constante de vitesse	207
4.3.5.	Activation des réactions	207
4.4.	Classement cinétique des réactions	211
4.4.1.	Réactions d'ordre 0	211
4.4.2.	Réactions d'ordre 1	212
4.4.3.	Réactions d'ordre 2	212
4.4.4.	Réactions d'ordre n	213
4.4.5.	Réactions réversibles	214
4.4.6.	Ordre partiel	215
4.4.7.	Analyse des résultats cinétiques	216
4.4.8.	Conclusion sur la cinétique	218
4.5.	Exercices d'application	218

Chapitre 6

Notions sur la production des composés chimiques

1.	Réacteurs chimiques	225
1.1.	Introduction sur les réacteurs	226
1.2.	Réacteurs idéaux	228
1.2.1.	Réacteurs parfaitement agités fermés	229

1.2.2.	Réacteurs parfaitement agités semi-fermés ou semi-ouverts . .	230
1.2.3.	Réacteurs ouverts	231
1.2.4.	Comparaison des réacteurs	236
1.3.	Réacteurs chimiques industriels	236
1.3.1.	Introduction	236
1.3.2.	Réflexions sur le choix d'un réacteur	237
1.3.3.	Classement des réacteurs industriels.	239
1.3.4.	Réacteurs monophasiques	240
1.3.5.	Réacteurs polyphasiques	244
1.3.6.	Accessoires connexes au réacteur de type « Grignard »	251
1.3.7.	Matériaux	254
1.3.8.	Contrôle du fonctionnement d'un réacteur	259
2.	Notions sur la qualité, la sécurité et l'environnement	260
2.1.	Risques rencontrés dans l'industrie chimique	261
2.1.1.	Risques toxicologiques.	263
2.1.2.	Risques incendie	271
2.1.3.	Risques explosion	279
2.1.4.	Risques environnementaux	285
2.1.5.	Sécurité dans l'usine.	287
2.1.6.	Analyse des risques.	292
2.2.	Traitement des déchets et des eaux usées industrielles	297
2.2.1.	Introduction sur les nuisances	298
2.2.2.	Composés gazeux	300
2.2.3.	Composés liquides	303
2.2.4.	Déchets solides	314
2.3.	Qualité dans l'industrie chimique	319
2.3.1.	Principes de base de la gestion de la qualité	320
2.3.2.	Gestion de la qualité	324

Deuxième partie

Exercices de synthèse

Chapitre 7

Grandeurs physicochimiques et mélanges

1.	Grandeurs moléculaires.	337
2.	Mélanges binaires et ternaires	348

Chapitre 8

Bilans-matière

1.	Bilans-matière dans les opérations de transfert	357
2.	Bilans-matière dans les neutralisations	378
3.	Bilans-matière dans les productions chimiques.	387

*Chapitre 9***Bilans thermiques**

- | | |
|---|-----|
| 1. Bilans thermiques dans les opérations physicochimiques | 425 |
| 2. Bilans thermiques dans les productions chimiques | 444 |

*Chapitre 10***Équilibres chimiques**

- | | |
|---|-----|
| 1. Équilibres chimiques statiques | 455 |
| 2. Cinétique appliquée au calcul de réacteurs | 487 |
| 2.1. Réacteurs agités discontinus | 487 |
| 2.2. Réacteurs agités continus | 495 |
| 2.3. Réacteurs agités continus en série | 497 |
| 2.4. Réacteurs de type piston | 498 |
| 2.5. Comparaison des réacteurs | 506 |
| 2.6. Exercice de synthèse | 511 |

*Troisième partie***Expérimentation***Chapitre 11***Bilans dans les opérations de transfert de matière et d'énergie**

- | | |
|---|-----|
| 1. Bilans massiques et thermiques | |
| dans les distillations discontinue et continue | 525 |
| 1.1. Notions théoriques sur la distillation | 525 |
| 1.1.1. Diverses méthodes de distillation | 525 |
| 1.1.2. Caractéristiques d'une rectification discontinue | 527 |
| 1.1.3. Caractéristiques d'une rectification continue | 530 |
| 1.2. Pratique des bilans massiques et thermiques | |
| dans la distillation discontinue | 533 |
| 1.2.1. Description de l'unité | 533 |
| 1.2.2. Étude de l'équilibre de la colonne en reflux total | 536 |
| 1.2.3. Résultats expérimentaux | 538 |
| 1.3. Pratique des bilans massiques et thermiques | |
| dans la rectification continue | 541 |
| 1.3.1. Description de l'unité | 541 |
| 1.3.2. Procédure | 545 |
| 1.3.3. Résultats expérimentaux | 546 |
| 2. Bilans massiques et thermiques dans une évaporation continue | 553 |
| 2.1. Notions théoriques sur l'évaporation | 553 |
| 2.1.1. Divers modes d'évaporation | 554 |

2.1.2. Divers types d'évaporateurs	555
2.1.3. Relations massiques et thermiques	555
2.2. Pratique des bilans massiques et thermiques dans l'évaporation . . .	557
2.2.1. Description de l'unité	557
2.2.2. Procédure	560
2.2.3. Résultats expérimentaux	562
3. Bilans massiques et thermiques dans une cristallisation discontinue. . . .	569
3.1. Notions théoriques sur la cristallisation.	569
3.1.1. Dissolution et cristallisation.	570
3.1.2. Divers types de cristallisation.	572
3.1.3. Bilans massique et thermique	573
3.2. Pratique des bilans massiques et thermiques dans la cristallisation discontinue	576
3.2.1. Description de l'installation.	577
3.2.2. Évaporation-cristallisation d'une solution de glycine en régime discontinu	579
3.2.3. Résultats expérimentaux	581
3.2.4. Conclusions	585
4. Bilans massiques dans les extractions liquide-liquide	585
4.1. Notions théoriques sur les divers types d'extraction	585
4.1.1. Notions générales.	586
4.1.2. Divers types d'extraction	587
4.1.3. Bilan-matière d'une extraction liquide-liquide	588
4.2. Pratique des bilans massiques dans l'extraction liquide-liquide discontinue	590
4.2.1. Procédure	590
4.2.2. Résultats expérimentaux	592
4.3. Pratique des bilans massiques dans l'extraction liquide-liquide continue.	597
4.3.1. Description de l'unité.	597
4.3.2. Procédure	597
4.3.3. Résultats expérimentaux	599
5. Bilans thermiques sur les échangeurs de chaleur	603
5.1. Notions théoriques sur les échangeurs thermiques	603
5.1.1. Transfert par conduction	603
5.1.2. Transfert par convection	604
5.1.3. Transfert par rayonnement	604
5.1.4. Échangeurs thermiques	604
5.2. Pratique des bilans sur les échangeurs thermiques	607
5.2.1. Description de l'unité.	607
5.2.2. Bilan thermique sur les échangeurs de chaleur	609
5.2.3. Résultats expérimentaux	610

Chapitre 12

Bilans massiques dans les synthèses

1. Bilans massiques dans la synthèse de la glycine	617
1.1. Notions théoriques	617
1.2. Réalisation de la synthèse.	619
1.2.1. Procédure	619
1.2.2. Résultats expérimentaux	622
2. Bilans massiques dans la synthèse de l'hydroxyde de potassium	627
2.1. Notions théoriques	627
2.1.1. Généralités	627
2.1.2. Principe de la synthèse.	627
2.1.3. Données physicochimiques	628
2.2. Réalisation de la synthèse.	628
2.2.1. Procédure	628
2.2.2. Résultats expérimentaux	630
3. Bilans massiques dans la synthèse du sulfate de potassium	633
3.1. Notions théoriques	633
3.1.1. Généralités	633
3.1.2. Principe de la synthèse.	634
3.1.3. Données physicochimiques	634
3.2. Réalisation de la synthèse.	635
3.2.1. Procédure	635
3.2.2. Résultats expérimentaux	638
4. Bilans massiques dans la synthèse et l'hydrolyse du borate de tributyle ..	641
4.1. Notions théoriques	641
4.1.1. Principe des opérations	641
4.1.2. Rectification azéotropique	642
4.1.3. Données physicochimiques	644
4.2. Procédure.	645
4.2.1. Produits et matériel	645
4.2.2. Synthèse du borate de tributyle	646
4.2.3. Hydrolyse du borate de tributyle	647
4.2.4. Dosages.	648
4.3. Résultats expérimentaux de la synthèse	650
4.3.1. Matières premières.	650
4.3.2. Résultats	651
4.4. Résultats expérimentaux de l'hydrolyse	653
4.4.1. Matières premières.	653
4.4.2. Résultats	654

Annexes

Annexe 1 – Principaux symboles schématiques utilisés en génie des procédés (extrait des normes ISO 10 628 : 1997).....	659
--	-----

Annexe 2 – Facteurs de conversion des unités des grandeurs mécaniques non usuelles en unités du système international	669
Annexe 3 – Caractéristiques physiques de quelques solides minéraux	672
Annexe 4 – Caractéristiques physiques de quelques solides organiques	674
Annexe 5 – Caractéristiques physiques de quelques liquides	675
Annexe 6 – Caractéristiques physiques de quelques gaz	678
Annexe 7 – Masses atomiques des éléments chimiques cités.	680
Annexe 8 – Titres massiques et concentrations de quelques solutions basiques en fonction de la masse volumique (à 15 °C)	681
Annexe 9 – Titres massiques et concentrations de quelques solutions acides en fonction de la masse volumique (à 15 °C)	684
Annexe 10 – Compositions des mélanges éthanol-eau en fonction de la densité.	691
Annexe 11 – Constantes des capacités thermiques molaires à pression constante de quelques gaz	695
Annexe 12 – Variations des enthalpies molaires de dissolution (ΔH_s°) et de dilution (ΔH_d°) avec la concentration	696
Annexe 13 – Enthalpies molaires de dissolution de quelques composés minéraux dans l'eau	699
Annexe 14 – Enthalpies standard de formation de quelques composés minéraux	702
Annexe 15 – Enthalpies molaires de dissolution de quelques composés organiques dans l'eau	704
Annexe 16 – Enthalpies standard de formation (ΔH_f°) et de combustion (ΔH_c°) de quelques composés organiques.	705
Annexe 17 – Constantes critiques	708
Annexe 18 – Évolution de la tension de vapeur des composés organiques avec la température du liquide.	712
Annexe 19 – Propriétés thermodynamiques de quelques solides minéraux (à 298 K)	715
Annexe 20 – Propriétés thermodynamiques de quelques composés hydrocarbonés (à 298 K)	718
Annexe 21 – Indicateurs de sécurité de quelques substances chimiques	720
Annexe 22 – Nouveaux pictogrammes d'étiquetage des produits chimiques et conseils d'utilisation	723
Annexe 23 – Caractéristiques physiques d'inflammabilité de quelques substances chimiques.	731
Annexe 24 – Enthalpies totales de vaporisation de l'eau en fonction de la pression absolue et de la température de vaporisation	734

Annexe 25 – Compositions des solutions aqueuses de saccharose en fonction de l'indice de réfraction	737
Annexe 26 – Caractéristiques physiques des solutions aqueuses de glycine	739
Bibliographie	741
Index des produits	743
Index des sujets	751

Préambule

Avant de commencer l'étude des principes fondamentaux, il est d'abord nécessaire de définir certains termes et d'aborder la finalité de l'enseignement de cette discipline dans son contexte industriel.

1. ■ Introduction sur le génie des procédés et la technologie chimique

1.1. Définitions

Le génie des procédés et la technologie chimique (GPTC) est une discipline qui se définit par ses quatre composants.

Génie (*engineering*) vient de ingénierie, lui-même issu du vieux français « *engeigneur* » et du latin populaire « *ingeniare* » qui désignait, jadis, celui qui faisait preuve d'intelligence, d'habileté et de ruse dans l'art d'imaginer des engins de guerre pour tromper l'ennemi. C'est maintenant l'acte de création industrielle dans lequel l'ingénieur intervient en concevant, bâtissant ou utilisant un appareil pour y fabriquer des produits utilisables dans la société.

Procédé (*process*) vient du latin « *procedere* » (aller de l'avant) qui indique la méthode à suivre pour obtenir un produit, c'est-à-dire transposer un mode opératoire de laboratoire en termes industriels. C'est donc, pour la chimie, l'ensemble des moyens et des méthodes mis en œuvre pour fabriquer et/ou séparer les composés issus de transformations chimiques.

Technologie (*technology*) est un amalgame des deux termes grecs « *tekhné* » (art, métier) et « *logos* » (discours). La technologie est donc la science des arts industriels qui étudie la construction des outils et des machines utilisés dans les diverses branches de l'industrie.

Chimie (*chemistry*), issu du latin médiéval « *chimia* », est la science qui étudie la constitution atomique et moléculaire des corps ainsi que leurs interactions, c'est-à-dire les propriétés physicochimiques des composés et leurs transformations quand ils sont mis en contact.

Le génie des procédés et la technologie chimique, que l'on appelle encore génie chimique (*chemical engineering*) est donc la spécialité de l'art de l'ingénieur chimiste, qui s'occupe de la *conception*, de la *construction*, de l'*installation* et du *fonctionnement* des appareils utilisés par les ingénieurs et dans lesquels la matière subit un changement d'état et/ou de composition. Par extension, le génie des procédés peut se définir comme la science pour l'ingénieur qui étudie la conception, l'optimisation, le dimensionnement et le fonctionnement des procédés de transformation (physique, chimique, biologique) des matières premières en produits industriels. Il peut se décomposer en deux parties :

- la première étudie les méthodes rationnelles qui permettent la transformation chimique (ou biologique) des matières premières en produits fonctionnels nécessaires à la société (génie de la réaction) ;
- la seconde étudie les séparations mécaniques ou physicochimiques qui permettent de purifier les matières premières et les produits obtenus après la réaction (génie de la séparation).

Le génie des procédés est en réalité une extension de la méthodologie du génie chimique à l'ensemble des procédés industriels de transformation qui permet le passage d'une synthèse effectuée au laboratoire à un procédé industriel en respectant les contraintes techniques, sécuritaires, environnementales et économiques.

Cette science couvre, par conséquent, un domaine très important de l'industrie puisqu'elle regroupe toutes les activités de production des divers produits, chimiques et apparentés, destinés à être vendus et utilisés dans la société. Dans la chaîne qui conduit de l'exploitation des ressources naturelles à la satisfaction des besoins sociaux, l'activité industrielle apporte en France 30 % de la VAT (valeur ajoutée totale) et la moitié de cette richesse est créée par les industries qui mettent en œuvre des procédés de transformation de la matière. L'autre moitié provient des industries manufacturières utilisant les matériaux et les produits intermédiaires fabriqués par les premières.

1.2. Historique

Le génie des procédés et la technologie chimique est une science relativement récente qui a été initiée en Angleterre en 1887 par Georges E. Davis. Celui-ci a lancé le premier l'idée de créer une catégorie de professionnels de l'industrie chimique qui remplirait à la fois les fonctions de chimiste, d'ingénieur mécanicien et thermicien, c'est-à-dire des spécialistes pouvant se charger à la fois de la réalisation et du fonctionnement des usines chimiques. Davis a écrit, en 1901, un ouvrage intitulé « *A Handbook of Chemical Engineering* » mais son idée n'a pas été suivie en Angleterre. En revanche, elle a été reprise aux États-Unis, sous une forme légèrement différente, en 1915, par Arthur D. Little qui a fait apparaître le concept d'opération unitaire dans un rapport au président du MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) de Boston. Cette étude avait été demandée pour essayer de résoudre les problèmes rencontrés, notamment avec le développement de la pétrochimie, dans le transfert des méthodes de laboratoire au milieu industriel. En effet, avec l'évolution scientifique, on s'est vite aperçu que les opérations de laboratoire n'étaient pas directement transposables au monde industriel. La création du génie

des procédés est donc une conséquence de la *demande extérieure du monde industriel*, confronté à de nouveaux problèmes (productivité, environnement, énergie, sécurité, qualité) et de la *dynamique propre du monde de la recherche*, forgeant sans cesse des concepts nouveaux et créant des produits de plus en plus sophistiqués.

À la suite du rapport de Little, un groupe d'universitaires américains, convaincu de cette évolution inéluctable de la chimie, a établi que tout procédé industriel pouvait se ramener à une combinaison logique d'un nombre restreint d'unités d'opérations physiques (*unit operations*) tels que broyage, filtration, distillation, absorption, séchage, etc. que l'on retrouve dans tous les domaines chimiques. Cette nouvelle présentation de l'industrie chimique a été publiée en 1923 dans un ouvrage intitulé « *Principles of Chemical Engineering* » par Walker, Lewis et Mc Adams. Le premier ouvrage en langue française n'a été publié qu'en 1937 par le professeur J. Danze (université de Liège) sous le titre de « *Opérations unitaires* ».

Cependant, les procédés unitaires où intervenaient les transformations chimiques ne faisaient pas l'objet d'études théoriques particulières et continuaient d'être transposés empiriquement du laboratoire à l'échelle industrielle en discontinu sans utiliser de méthodes rationnelles de dimensionnement et d'extrapolation à l'échelle industrielle (*scale up*).

L'intérêt du mode continu s'est amplifié quand on s'est rendu compte qu'il pouvait permettre d'atteindre de grosses capacités de production, tout en diminuant les besoins en main-d'œuvre. Ces efforts d'augmentation de la productivité ont conduit R. Bird, W. E. Stewart et E. N. Lightfoot à publier « *Transport Phenomena* » en 1960. Cet ouvrage traite, sur une base analytique, des phénomènes de transport appliqués à la matière, à la chaleur et à la quantité de mouvement dans les opérations unitaires.

Le génie des réactions chimiques (*chemical reaction engineering*) est venu compléter les bases analytiques des phénomènes de transport, au début des années 1960, en s'intéressant plus particulièrement aux modes de fonctionnement des appareils dans lesquels la matière subit une modification chimique et en mettant en exergue la cinétique et la catalyse. Le réacteur (appareil dans lequel est effectuée la transformation chimique) est maintenant considéré comme le « cœur » du procédé puisque son dimensionnement et son type de fonctionnement peuvent influencer la nature, la qualité et la quantité des produits formés et donc modifier les étapes des séparations en aval (opérations unitaires) qui restent généralement les plus coûteuses à mettre en œuvre.

1.3. Perspectives

Le génie des procédés s'affirme maintenant comme une science à part entière. Sa méthodologie s'est révélée indispensable pour améliorer la productivité industrielle, en dépassant le stade purement chimique et en s'étendant à tous les procédés de transformation. Il a permis d'étudier les méthodes empiriques (ou semi-empiriques), longues, coûteuses et parfois inadaptées, de les moderniser et même de les remplacer progressivement par de nouvelles techniques qui allient les analyses scientifiques, les traitements numériques et les impacts économiques, sécuritaires

et environnementaux. Cette évolution positive n'a pu se faire qu'en assurant une meilleure formation initiale et tout au long de la vie de ses acteurs.

Le génie des procédés n'a été introduit que tardivement en France (1950) et son développement est toujours insuffisant. Dans un rapport du ministre de la Recherche et de la Technologie (1991) il a même été spécifié que le retard pris par notre pays dans ce domaine était préoccupant. Des efforts ont été faits et le génie des procédés continue d'être une discipline de base dans toutes les formations technologiques (écoles d'ingénieurs, IUT, STS). En revanche, cette discipline continue d'être ignorée par un trop grand nombre de formations universitaires à connotation professionnelle alors que c'est dans les universités américaines que le génie chimique a été développé à la suite des pressions scientifiques et économiques.

2. ■ Élaboration d'un produit

Afin de définir plus précisément les domaines d'application du génie des procédés et le rôle joué par le chimiste évoluant dans cette spécialité, il est nécessaire de situer préalablement cette activité dans la chaîne d'élaboration d'un produit. Le but d'une entreprise chimique est, comme dans les autres secteurs d'activités, de réaliser des bénéfices en vendant les produits qu'elle fabrique. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de passer par plusieurs stades.

- *Découvrir* des nouveaux produits susceptibles d'améliorer le bien-être de l'homme. C'est la mission dont sont chargés les *chercheurs* des laboratoires de recherche (docteurs) puisqu'ils ont pour objectif de synthétiser les nouvelles molécules dont l'intérêt et l'efficacité seront ensuite testés dans des laboratoires spécialisés : toxicologie et pharmacologie (produits pharmaceutiques), mécanique (polymères, matériaux, alliages spéciaux), dermatologie (cosmétiques), tensioactifs, etc.

- *Analyser* la pureté et déterminer la structure des matières premières, des intermédiaires de synthèse et des produits finis. Cette activité se situe au niveau de la recherche fondamentale, de la production, de la séparation et de la mise en forme de la spécialité. C'est la mission dont sont chargés les *analystes* qui peuvent, avec les moyens actuels, déterminer la structure de n'importe quel composé et sa composition dans un mélange. Il est maintenant possible de détecter des traces d'impuretés généralement inférieures au ppm (1 ppm = 1 partie par million, soit 1 g dans 10^6 g) et souvent voisines du ppb (1 ppb = 1 partie par billion, soit 1 g dans 10^{12} g).

- *Produire* les composés en quantité importante et dans les conditions économiques et sanitaires les plus favorables pour être compétitif. Cette production nécessite de nombreuses recherches préalables de mise au point du procédé industriel. Ces études font appel à des connaissances en chimie et en génie des procédés, mais aussi en mécanique, en électronique, en informatique, etc. C'est la mission dont sont chargés les *ingénieurs de développement et de production*.

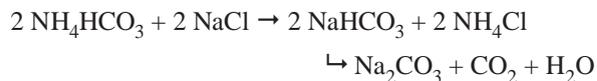
- *Vendre* les produits avec la marge bénéficiaire optimale. C'est évidemment la mission du *technico-commercial*.

Pour mieux fixer le rôle du chimiste dans la production, il est d'abord nécessaire de préciser quelques définitions se rapportant à la production industrielle des composés chimiques.

3. ■ Génie des procédés, technologie chimique et chimie industrielle

3.1. Terminologie

Pour bien souligner la nuance entre le génie des procédés, la technologie chimique et la chimie industrielle, considérons l'exemple de deux procédés apparemment aussi différents que la fabrication du carbonate de disodium et d'un antibiotique à très haute valeur ajoutée. Le carbonate de disodium est l'un des produits chimiques le plus consommé dans le monde et sa production annuelle mondiale est de plus de 50 millions de tonnes (par exemple à partir du procédé Solvay, par double décomposition de l'hydrogénocarbonate d'ammonium avec le chlorure de sodium suivi d'une décomposition thermique de l'hydrogénocarbonate de sodium) est relativement simple sur le plan chimique et se fait en deux étapes :



En revanche, la synthèse de l'antibiotique nécessite de nombreuses étapes et le principe actif est utilisé à faible dose. Une production journalière de quelques dizaines de kilogrammes est parfois suffisante pour couvrir les besoins. Le schéma réactionnel est évidemment totalement différent mais, dans les deux procédés, on utilise des méthodes et des techniques semblables : cristallisation, filtration, séchage des solides, évaporation des solvants, absorption des gaz, etc. De plus, ces opérations peuvent être réalisées dans des appareils de conception voisine même si les tailles sont très différentes.

• **Le génie des procédés** (*processes engineering*) (méthodologie) regroupe l'étude et la mise en œuvre des appareils (réacteurs, filtres, séchoirs, évaporateurs, colonnes, etc.) du point de vue de leur *principe*, de leur *conception*, de leur *fonctionnement dans des conditions optimales* et de leur *intégration dans une chaîne de production*. Il nécessite de connaître toutes les notions de la physicochimie des opérations unitaires et du génie de la réaction utilisées dans l'industrie chimique (répertoriées dans le paragraphe 3 du chapitre 1).

• **La technologie chimique** (*chemical technology*) concerne la *réalisation de ces appareils*, de leur structure mécanique et des matériaux de construction. Le spécialiste en technologie est un expert en mécanique appliquée et en calcul d'appareils. Il est chargé de la réalisation des installations définies par le concepteur.

• **La chimie industrielle** (*industrial chemistry*) se réfère à la nature des réactions chimiques et des procédés dans lesquels la matière subit un changement de nature et/ou de composition. Dans cette discipline, on utilise les techniques du génie des procédés et les appareils construits par le technologue chimiste. Cette branche de la chimie a pour objet la recherche et l'utilisation des moyens mis en œuvre pour *fabriquer*, dans les conditions *économiques* et *sociales* les meilleures, tous les produits chimiques utilisés dans la société. Cette définition souligne, à côté de son aspect technique (production optimale, qualité, stabilité), ses aspects économique (prix de revient) et social (hygiène, sécurité, environnement). Elle regroupe

donc l'ensemble des secteurs industriels concernés par la fabrication des matières premières et des produits finis, faisant appel à des procédés de transformation de la matière, utilisés dans notre société : textiles, combustibles, matériaux de construction, produits pharmaceutiques, cosmétiques, détergents, produits métallurgiques, matières plastiques, produits agroalimentaires, biomolécules, etc.

3.2. Missions du « chimiste industriel »

Le « chimiste industriel » exerce une activité intermédiaire ou coordinatrice entre le chercheur (laboratoires de recherche) et le concepteur (ou le constructeur) d'appareils utilisés dans l'industrie chimique. Il doit être en mesure, à partir d'un mode opératoire de laboratoire (très souvent inexploitable en milieu industriel), de déterminer les diverses opérations chimiques et physiques à mettre en œuvre pour transposer le protocole à l'échelon industriel, de choisir les appareils les mieux adaptés au procédé et de chiffrer le coût de fabrication du produit. Il doit donc dominer à la fois plusieurs disciplines :

- la *chimie organique et/ou minérale* pour maîtriser les diverses transformations chimiques de la matière susceptibles d'intervenir dans chaque appareil. Il devra en particulier être en mesure de refaire complètement le protocole d'une synthèse originale effectuée au laboratoire pour l'adapter à la production. Il devra utiliser des réactifs et des solvants mieux adaptés au monde industriel (pour des raisons de sécurité, de prix, de disponibilité ou de toxicité) et, généralement reconcevoir intégralement le schéma réactionnel d'origine ;
- le *génie de la réaction chimique* pour augmenter la productivité en tenant compte des contraintes imposées par la sécurité et la préservation de l'environnement. Ce chimiste devra être en mesure d'optimiser les divers facteurs qui influencent le rendement et la sélectivité d'une réaction et trouver les conditions thermodynamiques et cinétiques les plus favorables. L'utilisation d'outils mathématiques et informatiques lui permettra de modéliser les données et d'extrapoler les résultats à l'échelle industrielle ou à un autre type de réacteur. Cette activité se déroule au laboratoire de développement puis au pilote (atelier comportant des appareils de taille intermédiaire entre le laboratoire et la production) ;
- la *physicochimie des procédés* pour transposer les diverses opérations de laboratoire à la fabrication pilote puis industrielle (la plupart de ces opérations élémentaires est effectuée d'une manière très empirique par les chercheurs) et pour savoir conduire les appareils industriels nécessaires à la production des molécules et à leur purification. Cette activité se déroule dans le pilote puis dans l'atelier de production ;
- la *physique pure et la mécanique appliquée* pour choisir l'appareil le mieux adapté au produit à traiter et, parfois, intervenir auprès du constructeur pour modifier un appareil existant ou imaginer un appareil spécifique d'une opération particulière ;
- l'*assurance qualité* (qualitologie, bonnes pratiques de fabrication). Ce concept repose sur des notions de maîtrise du procédé, d'anticipation des besoins, des relations producteur-consommateur et d'innovation. Elle prouve que les

moyens techniques, organisationnels et humains ont été mis en œuvre et éprouvés dans l'entreprise pour s'assurer que l'on retrouvera, à l'échelle industrielle, la qualité des produits obtenus au laboratoire et pour garantir un niveau constant du produit dans le temps.

Il doit, par ailleurs, avoir des connaissances de plus en plus approfondies dans des disciplines telles que l'*automatisation*, la *régulation*, l'*informatique appliquée* et la *robotique* puisque l'industrie chimique fait de plus en plus appel à ces techniques pour des questions de sécurité, de salubrité, de prix de revient et pour mieux satisfaire les besoins des utilisateurs.

3.3. Débouchés du « chimiste industriel »

Pour mener à bien ses missions, le chimiste chargé de l'industrialisation des procédés devra posséder une solide formation scientifique doublée de qualités physiques, humaines, relationnelles, de commandement et d'organisation. C'est un secteur souvent négligé par les chimistes et cette désaffection a pour conséquence de laisser parfois vacant un certain nombre de postes présentant de bons profils de carrière dans plusieurs secteurs. En :

- **procédé** : ce chimiste est chargé de la recherche du meilleur procédé (équipements et conditions de fonctionnement) permettant d'optimiser le rendement d'une réaction en fonction des spécifications du produit imposées par le client (pureté, aspect, couleur, granulométrie, etc.) ;
- **production** : ce chimiste est responsable des aspects chimique, mécanique et énergétique d'une unité de production pour que celle-ci fonctionne avec un rendement maximal et dans des conditions économiques et sociales satisfaisantes. Il est chargé d'optimiser la fabrication en veillant aux coûts, aux délais, à la qualité et à la sécurité. L'ingénieur production est l'homme-orchestre de la fabrication, il doit être très pragmatique et aussi un animateur d'équipes avisé ;
- **projet** : ce chimiste doit être pluridisciplinaire pour évaluer la faisabilité d'un projet. Il est chargé d'estimer les coûts, les délais et les partenaires qui devront s'impliquer dans le développement du produit ou du procédé. Il devra animer des groupes de travail et des comités de pilotage tout en effectuant de la veille technologique.

La finalité du génie des procédés et de la technologie chimique, dans un établissement donnant un enseignement pluridisciplinaire en chimie, n'est pas de préparer à la conception et à la réalisation des appareils utilisés pour les synthèses chimiques ou les séparations physicochimiques. Il doit, en revanche, permettre aux chimistes de savoir choisir et utiliser les appareillages existants les mieux adaptés aux besoins. Il sera donc nécessaire d'acquérir le langage et les connaissances de base de l'art pour dialoguer avec les spécialistes de la technologie chimique (constructeur) qui le conseilleront dans les choix ou réaliseront l'appareil adapté aux besoins réels. Il est donc indispensable d'avoir des notions de génie des procédés et de connaître le fonctionnement des principaux appareils destinés à être mis en œuvre en fabrication industrielle.

Véritable traité de référence et guide pratique, **Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique** répertorie et analyse les principes de base incontournables pour réaliser des synthèses industrielles de produits chimiques. Il présente également les fondements de la qualité, de la sécurité et de l'environnement, notions indispensables à maîtriser avant de mettre en route et de conduire un procédé.

Organisé en 3 parties, cet ouvrage rassemble toutes les notions théoriques et pratiques nécessaires aux chimistes avant d'industrialiser un procédé physique ou chimique. Il permet :

– **d'assimiler les théories et concepts fondamentaux impliqués dans les procédés** (grandeurs physicochimiques, bilans de matière et d'énergie, équilibres physiques et chimiques, etc.), illustrés par 54 exercices d'application. Un chapitre est également consacré à la mise en œuvre des opérations chimiques en présentant les connaissances de base sur les réacteurs chimiques idéaux et industriels, sur la qualité, la sécurité et l'environnement ;

– **d'acquérir une méthodologie efficace pour la conduite de calculs de base** à travers 84 exercices et problèmes de synthèse résolus issus de situations industrielles réelles et de la pratique professionnelle. De difficulté croissante et commentés pas à pas, ces exercices permettent de progresser et de vérifier ses acquis ;

– **de savoir interpréter et maîtriser les opérations physiques et chimiques les plus courantes**. Totalement inédite, cette partie reposant sur des déterminations expérimentales présente des exemples de bilans effectués dans des opérations de séparation ou de synthèse chimique réalisées à l'échelon pilote (rappel des notions théoriques, description exhaustive du matériel utilisé et des opérations à effectuer, présentation et interprétation des résultats expérimentaux...).

Enrichie de 26 annexes rassemblant les principales données utilisées et de deux index détaillés, cette nouvelle édition constitue un support indispensable pour les étudiants et enseignants en génie des procédés et en chimie industrielle des IUT, STS, licences et masters professionnels ainsi que des écoles d'ingénieurs. Il sera également utile aux ingénieurs et techniciens supérieurs travaillant dans les domaines production et R&D de l'industrie chimique.

Henri Fauduet, docteur-ingénieur en chimie organique, a débuté sa carrière comme ingénieur de recherche dans l'industrie chimique et l'administration. Il a été ensuite nommé maître de conférences puis professeur des universités. Il enseigne le génie chimique depuis 25 ans à l'Institut universitaire technologique d'Orléans où il a eu pour mission de rénover le hall de génie chimique et de développer les activités de recherche.

www.lavoisier.fr

