

Henri Fauduet

Procédés de séparation physicochimique des solides



Lavoisier
TEC & DOC

Procédés de séparation physico-chimique des solides

Henri Fauduet

Du même auteur

*Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique
Aspects théoriques et pratiques 2^e Éd.,
Lavoisier Tec & Doc, 2012*

*Mécanique des fluides & des solides appliquée à la chimie,
Lavoisier Tec & Doc, 2011*

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille

Pour plus d'informations sur nos publications



newsletters.lavoisier.fr/9782743026714

Avant-propos

Les procédés de séparation jouent un rôle de plus en plus important dans la vie contemporaine. En effet, nous consommons des produits industriels qui ont subi de multiples transformations avant d'être utilisés pour améliorer notre bien-être (produits alimentaires, textiles, détergents, pharmaceutiques, cosmétiques, *etc.*). Après leur utilisation, ces composés dégradés et leurs emballages deviennent des déchets et doivent être triés en vue de leur destruction ou de leur recyclage pour ne pas polluer l'environnement. De leur élaboration à leur destruction, tous ces produits subissent de nombreuses opérations de séparation. La production industrielle doit être réalisée rigoureusement pour conduire à un composé de qualité dans des conditions économiques et sanitaires satisfaisantes. Des opérations de séparation sont mises en œuvre dans les industries chimiques et parachimiques pour purifier les matières premières, séparer les intermédiaires de synthèse et les produits finis du milieu réactionnel puis les purifier avant de les commercialiser. Ces transformations sont effectuées avec des composés synthétiques mais aussi des ressources naturelles d'origine terrestre, marine ou photosynthétique. Toutes ces opérations mettent en œuvre des produits sous forme gazeuse, liquide, solide ou polyphasique. Le traitement des fluides est relativement facile, comparativement aux milieux diphasiques, aussi bien pour l'hydraulique que pour les séparations des composants. La présence d'un solide dans le milieu est souvent génératrice de problèmes.

Les procédés de séparation des milieux comportant des solides peuvent être de simples opérations mécaniques, comme dans le cas de la décantation, la filtration, la centrifugation, le dépoussiérage ou les séparations par procédés membranaires. Toutes ces techniques ont été décrites dans un ouvrage précédent (*cf.* H. Fauduet, J. Bonnin, (2019), *Opérations unitaires de séparations mécaniques des milieux diphasiques en chimie – Génie des procédés*, Ellipses). Les procédés peuvent aussi faire intervenir les équilibres entre phases liquide-gaz, liquide-liquide, liquide-solide, gaz-solide. Les opérations de séparation qui procèdent par équilibre entre phases liquide-gaz (ou vapeur) et liquide-liquide non miscibles telles que la rectification, l'évaporation, l'absorption et l'extraction liquide-liquide ont également été décrites dans un ouvrage précédent (*cf.* H. Fauduet, (2019), *Opérations unitaires de séparations avec équilibre entre phases fluides en chimie – Génie des procédés*, Ellipses). Le présent ouvrage est complémentaire des deux précédents et traite des opérations de séparation se produisant avec équilibre entre une phase solide et une phase fluide. Il traite donc des opérations unitaires telles que l'extraction solide-liquide, l'adsorption des gaz et des solutions, l'échange d'ions, la cristallisation, le séchage des solides et la déshydratation.

L'extraction solide-liquide consiste à mettre en contact un solvant possédant une affinité pour un soluté inclus dans une phase solide. Le contact entre le liquide et le solide doit être suffisamment prolongé et efficace pour que le soluté ait le temps de

se dissoudre et diffuser hors de la matrice solide. Le composé à valoriser est ensuite séparé du solvant par les techniques habituelles (évaporation, cristallisation, *etc.*). Cette opération est utilisée fréquemment dans les industries chimiques et parachimiques pour obtenir des matières premières à partir des ressources végétales et minérales.

L'adsorption est l'opération inverse de l'extraction solide-liquide puisqu'elle consiste à fixer un soluté, initialement dissous dans un solvant gazeux ou liquide, sur un support solide poreux. L'adsorption du soluté peut se faire physiquement au niveau des imperfections et des pores du solide. Elle peut se faire aussi chimiquement lorsque les forces d'attraction sont plus importantes et qu'il existe une affinité chimique entre les groupements de surface de l'adsorbant et l'adsorbat. Il est ensuite possible de procéder à une désorption, plus ou moins facile en fonction de la nature des forces de liaison. L'adsorption et l'extraction solide-liquide sont généralement gérées par des lois physicochimiques analogues.

La mise en œuvre technologique de l'échange d'ions est très proche de l'adsorption mais les lois qui gouvernent les deux procédés sont différentes. En effet, l'échange d'ions est une réaction de double décomposition mettant en contact une solution aqueuse ionique avec une matrice solide, anionique ou cationique, porteuse d'ions mobiles de charge opposée à celle de la résine. Il se produit alors un échange entre les ions de même nature fixés sur la résine et contenus dans la solution. Cette technique permet d'effectuer un échange d'ions en milieu solide-liquide ou de désioniser une solution si elle est traitée successivement par des échangeurs cationiques et anioniques. Quand la résine est saturée, elle est régénérée par une solution de force ionique supérieure pour être recyclée dans une autre opération.

La cristallisation à partir d'une solution est à la fois une opération d'isolement d'un solide dans un mélange, une opération de purification (recristallisation) et de mise en forme des solides présentant un intérêt économique. Cette opération apparaît facile mais la réalisation est délicate quand on veut parfaitement contrôler la morphologie, la taille des cristaux et leur distribution granulométrique. Sa maîtrise nécessite des étapes rigoureuses et son extrapolation industrielle est parfois délicate.

Le séchage des solides est réalisé après la cristallisation et la filtration du solide et permet d'éliminer le solvant d'imprégnation en effectuant une évaporation thermique ou convective. Pour les produits thermosensibles, on préfère effectuer une déshydratation qui permet d'obtenir directement un solide sec à partir d'une solution aqueuse en alliant ainsi cristallisation, filtration et séchage. On peut alors effectuer une atomisation, à température élevée mais pendant un temps très bref ou une lyophilisation qui est réalisée à basses température et pression.

Cet ouvrage est organisé en deux parties :

- la première partie théorique détaille les principales opérations de séparation dans lesquelles intervient une phase solide. Les cinq chapitres de cette partie décrivent successivement l'extraction solide-liquide, l'adsorption, l'échange d'ions, la

cristallisation et le séchage et déshydratation. Chaque chapitre traite les notions théoriques (généralités, principales lois thermodynamiques et cinétiques, divers types de procédés, dimensionnement) et les techniques et appareillages permettant de faire la séparation. À la fin du chapitre, on trouve un résumé des notions essentielles de l'opération ;

- la seconde partie est dédiée aux applications développées dans la première partie. Elle comporte deux chapitres réservés à des exercices sur l'extraction des solides et la purification des solutions, pour le premier et, au traitement des solides pour le second. Les corrections des exercices sont suffisamment détaillées pour assimiler des concepts théoriques décrits dans les chapitres précédents. Les trois derniers chapitres résument des travaux de recherche effectués par plusieurs doctorants dans le cadre de la préparation de leurs thèses. Le chapitre 8 est relatif à l'extraction solide-liquide de produits d'origine végétale comme la protopine, extraite de la fumeterre ou encore des sucres réducteurs extraits de l'aubier de tilleul. Le chapitre 9 traite de la valorisation de certains produits végétaux pour l'adsorption et l'échange d'ions comme la sciure de pin sylvestre pour adsorber les métaux lourds ou le charbon actif pour adsorber les phtalates ou les composés colorés des vinasses de sucrerie ou encore la purification de la bêtaïne des vinasses sur résine échangeuse d'ions. Le dernier chapitre se rapporte à la cristallisation de la glycine synthétique précipitée du milieu réactionnel suivie d'une recristallisation permettant de conduire à des cristaux de grande pureté et de qualité granulométrique resserrée. Ces chapitres, totalement originaux, permettent de préciser certaines notions théoriques et d'améliorer la connaissance du procédé en analysant et modélisant les résultats expérimentaux.

Je remercie chaleureusement les anciens doctorants qui ont effectués les travaux expérimentaux de grande qualité décrits dans les chapitres 8, 9 et 10 : Hanatou Adamou Harouna-Oumarou, Vincent Caqueret, Catherine Couriol, Tatianne Ferreira de Oliveira, Mario Moscosa-Santillan, Lovaso Rakotondramasy-Rabesiaka et Christian Taty-Costodès. Leur compétence et leur rigueur scientifique leur a permis d'acquérir une situation à la mesure de leurs talents, aussi bien dans l'industrie que dans l'enseignement supérieur, dans trois continents. C'est une très grande satisfaction pour les encadrants. Je remercie également mes collègues, de l'IUT d'Orléans et du Cnam de Paris, qui ont co-encadré ces travaux et participé aux publications relatives aux résultats présentés dans cet ouvrage : Olivier Bals, Johanne Bonnin-Paris, Stéphane Bostyn, Benoit Cagnon, Olivier Chedeville, Alain Delacroix, Jean-Louis Havet, Catherine Porte et Yu-Shan Ho. Je remercie aussi Bernard Gourgousse, professeur agrégé de chimie honoraire au Centre de Ressources de Génie Chimique de l'Académie d'Orléans-Tours, pour la relecture de cet ouvrage, sa disponibilité et les discussions fructueuses que nous avons échangées.

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

A	coefficient ou constante quelconque (variable)
A	masse ou débit massique de l'alimentation (kg ou $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
A	surface, section droite (m^2)
$a = \frac{dS}{S dz}$	aire interfaciale (m^{-1})
a	coefficient directeur d'une droite ou pente (variable)
a	constante quelconque (variable)
A_c	section droite de la colonne (m^2)
a_p	surface de contact interfaciale (m^2)
B	vitesse de nucléation ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
b	constante d'adsorption de Langmuir ($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)
b	constante quelconque (variable)
b	ordonnée à l'origine d'une droite (variable)
b	ordre cinétique de nucléation (sans dimension)
$Bi = \frac{K_T r_p}{D_{eff}}$	nombre de Biot (sans dimension)
C	capacité utile d'une résine (éq m^{-3}) ;
C, c	capacité thermique molaire ou massique ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ou $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
C	coefficient de traînée (sans dimension)
C, c	concentration molaire ou massique ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ ou $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C	masse ou débit massique des cristaux ou du soluté (kg ou $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
C_{ads}	capacité d'adsorption (sans dimension)
C_e	concentration à l'équilibre ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
C_p, c_p	capacité thermique à pression constante molaire ou massique ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ou $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
C_s, C^*	concentration à saturation ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C_t	concentration au temps t ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C_v	charge volumique d'une résine (s^{-1})
D	coefficient de diffusion ou diffusivité ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
D, d	diamètre, épaisseur (m)
d	différentielle (sans dimension)
$\frac{dc}{dx}$	gradient de concentration ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-4}$)

d_f	diamètre final de la particule (m)
d_g	diamètre de rupture d'une goutte (m)
d_m	diamètre moyen en masse (m)
d_n	diamètre moyen en nombre (m)
dp, dT, dV	variation de pression (Pa), de température (K), de volume (m ³)
d_s	diamètre des cristaux de semence (m)
$\frac{dT}{dx}$	gradient de température (K.m ⁻¹)
$\frac{du}{dx}$	gradient de vitesse (s ⁻¹)
E	débit massique d'eau éliminée par séchage (kg.s ⁻¹)
E	énergie, travail (J)
E	énergie d'activation ou d'adsorption (J.kg ⁻¹ ou J.mol ⁻¹)
e	épaisseur ou largeur (m)
E_G	énergie d'activation de la croissance (J.mol ⁻¹) ;
E_g	efficacité globale de plateau (sans dimension)
E_m	efficacité de Murphree (sans dimension)
F	facteur de composition (sans dimension)
F	masse ou débit massique de filtrat (kg ou kg.s ⁻¹)
f	fonction (sans dimension)
F_{ion}	fuite ionique (sans dimension)
f_s	facteur de forme surfacique (sans dimension)
f_v	facteur de forme volumique (sans dimension)
$G = \rho u$	débit massique surfacique (kg.m ⁻² .s ⁻¹)
G	masse ou débit massique de l'air (kg ou kg.s ⁻¹)
G	masse d'adsorbat (kg)
$G = \frac{dL}{dt}$	vitesse de croissance linéaire du cristal (m.s ⁻¹)
g	accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$)
g	ordre cinétique de croissance (sans dimension)
\mathcal{H}	constante de Henry (Pa)
H	enthalpie molaire ou massique (J.mol ⁻¹ ou J.kg ⁻¹)
H, h	hauteur (m)
h	coefficient de transmission thermique par convection (W.m ⁻² .K ⁻¹)
h	rétention d'humidité d'une résine (sans dimension)
h	taux d'extraction initial (sans dimension)
h_c	hauteur de colonne (m)
$HEPT$	hauteur équivalente à un plateau théorique (sans dimension)
HUT	hauteur d'une unité de transfert (sans dimension)
I_{ns}	indice de non sphéricité, facteur de forme (sans dimension)
j	ordre de la nucléation secondaire (sans dimension)
J_p	fréquence de nucléation primaire (nombre de germes. m ⁻³ .s ⁻¹)
J_s	fréquence de nucléation secondaire (nombre de germes m ⁻³ . s ⁻¹)

K	coefficient global de transmission thermique ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
K, k	coefficient de transfert de matière (m.s^{-1})
K	constante (cinétique, thermodynamique) (variable)
K	constante d'équilibre de dissociation (variable)
K, k	constante quelconque (variable)
k_{ads}	constante de vitesse d'adsorption de Bohart-Adams ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
k_B	constante entropique de Boltzmann ($k_B = 1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)
k_f	constante de Freundlich (variable)
k_g	constante cinétique de croissance (variable) ;
k_i	constante de diffusion intraparticulaire ($\text{mol.kg}^{-1}.\text{s}^{-0,5}$)
k_p	constante cinétique de nucléation primaire (variable) ;
k_s	constante cinétique de nucléation secondaire (variable)
K_x, K_y	conductance globale du liquide (G) ou du solide (L) ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
k_0	constante cinétique indépendante de la température (variable)
k_1	constante cinétique du pseudo-premier ordre (s^{-1})
k_2	constante cinétique du pseudo-second ordre ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
L, l	enthalpie molaire ou massique de changement d'état (J.mol^{-1} ou J.kg^{-1})
L, l	longueur quelconque (m)
L	masse ou débit massique de la sousverse (kg ou kg.s^{-1})
L	taille des cristaux (m)
L_c, l_c	enthalpie molaire ou massique de cristallisation (J.mol^{-1} ou J.kg^{-1})
L_s	taille des cristaux d'ensemencement (m)
M	masse molaire (kg.mol^{-1})
m	masse quelconque (kg)
m	paramètre quelconque (variable)
m	pente moyenne de la courbe d'équilibre (sans dimension)
m_a	masse d'air sec (kg)
M_c, M_T	concentration des cristaux en suspension dans la solution (kg.m^{-3})
m_c	masse de cristaux (kg)
m_s	masse de cristaux d'ensemencement (kg)
m_{solv}	masse de solvant (kg)
m_v	masse de vapeur d'eau (kg)
N	puissance transmise par l'agitateur à la solution (W.kg^{-1})
n	constante ou coefficient quelconque (variable)
n	densité de population d'une suspension (m^{-4})
n	nombre d'étage, numéro d'étage (sans dimension)
n	ordre de la nucléation primaire (sans dimension)
n	quantité de matière (mol)
N_c	vitesse critique de rotation de l'agitateur (tr.s^{-1})
n_c	nombre de cristaux (sans dimension)
$NET (NPT)$	nombre d'étages (plateaux) théoriques (sans dimension)
$Nu = \frac{h d_p}{\lambda}$	Nombre de Nusselt (sans dimension)

NUT	nombre d'unités de transfert (sans dimension)
N_0	capacité d'adsorption de la colonne (kg.m^{-3})
$1/n$	paramètre d'adsorption
P	puissance fournie (W)
p	pression (Pa)
p_a	pression absolue (Pa)
p_{atm}	pression atmosphérique (Pa)
$P_r = \frac{\mu c_p}{\lambda}$	Nombre de Prandtl (sans dimension)
p_t	pression totale (Pa)
p°	pression (tension) de vapeur du liquide (Pa)
Q, q	quantité de chaleur (J)
q	quantité de soluté adsorbé (kg.kg^{-1})
q_e	quantité de soluté adsorbé à l'équilibre (kg.kg^{-1})
q_m	débit massique (kg.s^{-1})
q_m	quantité maximale de soluté adsorbé (kg.kg^{-1})
q_{mDRK}	capacité maximale de remplissage des micropores (mol.m^{-3})
q_n	débit molaire (mol.s^{-1})
q_v	débit volumique ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
R	capacité totale d'échange d'une résine (éq.m^{-3} , éq.kg^{-1})
R	constante des gaz parfaits ($R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
R	masse ou débit massique du résidu (kg ou kg.s^{-1})
R	rapport massique solide/solvant (sans dimension)
R, r	rayon (m)
$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$	nombre de Reynolds (sans dimension)
R_G	vitesse de croissance des cristaux ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
$R_L = \frac{I}{I + bC_0}$	constante d'équilibre adimensionnelle (sans dimension)
S	masse ou débit-masse de solvant ou de solide (kg ou kg.s^{-1})
S	salinité d'une eau (éq.m^{-3})
s	solubilité du soluté (concentration massique) ($\text{g soluté}/100 \text{ g de solvant}$)
S_p	surface d'une particule (m^2)
s_v	surface spécifique volumique (m^{-1})
T, T_K	température absolue (K)
t	température relative ($^\circ\text{C}$)
t	temps, durée (s)
t_a	temps d'adsorption (s)
t_b	temps de percée (s)
T_c	température critique (K)
T_0	température prise dans les CNTP (K)
u	vitesse de déplacement ou d'écoulement (m.s^{-1})

u_m	vitesse moyenne (m.s^{-1})
u_s	vitesse de séchage (m.s^{-1})
V	masse ou débit massique de la surverse (kg ou kg.s^{-1})
V	volume d'une molécule dans un germe (m^3)
V	volume quelconque (m^3)
V_p	volume d'une particule (m^3)
V_0	volume pris dans les CNTP (m^3)
W	travail, énergie (J)
w	titre massique (sans dimension)
$W_{\text{mésop}}$	volume mésoporeux (m^3)
W_t	volume total de porosité (m^3)
W_0	volume microporeux (m^3)
X	rapport massique du soluté fixé sur l'adsorbant (kg.kg^{-1})
$X = \frac{c}{c+s}$	rapport massique soluté/solution (sans dimension)
X	taux d'humidité de l'air (sans dimension)
x	titre massique ou molaire de la phase L (sans dimension)
Y	humidité absolue de l'air (kg.kg^{-1})
$Y = \frac{r}{c+s}$	rapport massique inerte/solution (sans dimension)
y	titre massique de la phase vapeur (sans dimension)
Z	hauteur du lit adsorbant (m)
z	hauteur, distance (m)

Alphabet grec

α	constante ou coefficient quelconque (variable)
α	taux d'extraction initial ($\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$)
β	constante d'extraction ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)
β	constante ou coefficient quelconque (variable)
β	facteur de séparation (sans dimension)
β	rapport de sursaturation (sans dimension)
γ	coefficient d'activité (sans dimension)
γ	tension interfaciale (superficielle) (J.m^{-2} , N.m^{-1} , kg.s^{-2})
Δ	différence de grandeurs (variable)
$\Delta C = C - C_s$	sursaturation absolue en concentration (kg.m^{-3})
ΔC_{max}	sursaturation maximale (kg.m^{-3})
ΔG	énergie libre molaire d'adsorption (J.mol^{-1})
ΔH	variation d'enthalpie (J)
ΔH_{vap}	enthalpie de vaporisation de l'eau (J)
ΔG^*	énergie libre d'activation critique (J.mol^{-1})
Δp	variation de pression (perte de charge) (Pa)
$\Delta T = T - T_s$	sursaturation absolue en température (K, °C)
ΔV	variation de volume (m^3)

$\Delta\theta$	différence de température ($^{\circ}\text{C}$)
$\Delta\mu_i$	différence de potentiels chimiques ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$)
ε	humidité relative (degré hygrométrique) (sans dimension)
ε	fraction de vide, porosité (sans dimension)
η	rendement ou efficacité (sans dimension)
θ	température relative de la solution ($^{\circ}\text{C}$)
θ_r	paramètre de temps adimensionnel (sans dimension)
θ_s	température à saturation (K)
λ	coefficient de conduction thermique (conductivité) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ;
μ	viscosité dynamique (Pa.s)
ρ	masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_a	masse volumique apparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_c	masse volumique des cristaux ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_p	masse volumique des particules ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_0	masse volumique d'un corps de référence ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Σ	somme des masses, des débits des quantités de matière (variable)
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,673\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
σ	rapport de sursaturation (sans dimension)
τ_s	taux de matières sèches (sans dimension)
τ_s	temps de séjour (s)
Φ	degré de saturation d'une colonne (sans dimension)
Φ	flux de matière ($\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
Φ	flux thermique (W)
Φ_c	diamètre de la colonne (m)
Φ_c	flux massique de transfert (vitesse de croissance) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Φ_C	flux thermique éliminé par l'eau du condenseur (W)
Φ_s	sphéricité (facteur de sphéricité) (sans unité)

Indice

A	alimentation, composé A
a	absolu, adsorption, air, alimentation, apparent
amb	ambiante
atm	atmosphérique
B	composé B
C	composé C, condenseur, cristaux
c	colonne, cristaux, croissance, soluté
e	entrée, équilibre
eff	effectif, efficace
F	filtrat
f	filtrat, final, froid
G, g	croissance, global, goutte
h	humide
i	constituant quelconque, interface

L, l	liquide, sousverse
m	massique, matière, maximal, moyen, Murphree
max	maximum
min	minimum
moy	moyen
n	molaire, numéro d'étage
p	paroi, particule, perte, pression constante, primaire, produit
r	inerte, refroidissement, résidu, rosée
ref	référence
s	saturation, séchage, secondaire, semence, sensible, solide, solvant, sortie, surfacique
sup	supérieur
T	température absolue
t	température relative, total
v	vapeur, volumique
0	référence, initial
Σ	mélange, somme

Exposant

*	à l'équilibre, à saturation
0	à l'origine

Tables des Matières

Avant-propos	V
Symboles et abréviations	IX
Table des matières	XVII

Première partie – Bases théoriques sur les opérations unitaires de séparation

Chapitre 1. Extraction solide-liquide

1. Généralités	3
1.1. Introduction	3
1.2. Origine des matières premières solides	3
1.2.1. Solides d'origine fossile	3
1.2.2. Solides d'origine végétale	4
1.2.3. Solides d'origine animale	5
1.3. Définitions	5
1.3.1. Définitions relatives au procédé	5
1.3.2. Terminologie et symboles	6
1.4. Description du procédé	6
1.5. Applications	7
2. Notions théoriques	8
2.1. Étude thermodynamique de l'extraction	8
2.1.1. Transfert de matière	8
2.1.2. Étude de l'équilibre solide-liquide	14
2.2. Étude cinétique de l'extraction	17
2.2.1. Modèle du pseudo-premier ordre	18
2.2.2. Modèle du pseudo-second ordre	19
2.2.3. Modèle d'Elovich	20
2.2.4. Modèle d'Arrhenius	21
2.3. Étude des procédés d'extraction	21
2.3.1. Extraction solide-liquide à étage unique	21
2.3.2. Extraction solide-liquide à courants croisés	23
2.3.3. Extraction solide-liquide continue à contre-courants à étages multiples	25
2.3.4. Extractions activées	28
2.3.5. Paramètres influents	29
2.4. Éléments de dimensionnement	35
2.4.1. Débit d'extrait	35
2.4.2. Concentration en soluté cible dans l'extrait	36
2.4.3. Rendements	36
2.4.4. Sélectivité	36

3. Techniques et appareillages	37
3.1. Techniques générales	37
3.1.1. Opérations discontinues	37
3.1.2. Opérations continues	37
3.2. Appareillages et techniques spéciales	39
3.2.1. Extraction sans appareil	39
3.2.2. Extracteurs d'ancienne génération	40
3.2.3. Extracteurs à lit fixe ou immobile	40
3.2.4. Extracteurs à lit mobile	42
3.2.5. Extracteurs à immersion	47
3.2.6. Extracteurs à agitation, à charges dispersées ou en suspension	48
3.2.7. Principales caractéristiques des appareils industriels	52
3.3. Extraction par fluide supercritique	52
3.3.1. État supercritique	53
3.3.2. Solvant supercritique	53
3.3.3. Utilisation des FSC en extraction	56
3.3.4. Applications industrielles des FSC	57
3.4. Exemples industriels d'extraction solide-liquide	59
3.4.1. Extraction des parfums	59
3.4.2. Extraction des huiles des graines	61
3.4.3. Extraction du sucre de betteraves	63

4. L'extraction solide-liquide en 10 points	65
--	----

Chapitre 2. Adsorption

1. Généralités	67
1.1. Introduction	67
1.2. Définitions	67
1.2.1. Physisorption	67
1.2.2. Chimisorption	68
1.2.3. Persorption	68
1.2.4. Capacité d'adsorption	69
1.2.5. Efficacité d'adsorption	69
1.2.6. Facteur de séparation	69
1.3. Adsorbants	69
1.3.1. Propriétés des adsorbants	70
1.3.2. Charbons actifs	72
1.3.3. Zéolites	73
1.3.4. Gels de silice	74
1.3.5. Alumines activées	74
1.3.6. Adsorbants à base de polymères	75
1.3.7. Autres adsorbants	75
1.4. Description du procédé	75
1.5. Applications	76

2. Notions théoriques	77
2.1. Étude thermodynamique de l'adsorption	77
2.1.1. Adsorption d'un gaz pur	78
2.1.2. Adsorption d'un mélange gazeux	89
2.1.3. Adsorption des liquides	90
2.1.4. Désorption et régénération de l'adsorbant	92
2.2. Étude cinétique de l'adsorption	93
2.2.1. Modèle du pseudo-premier ordre	94
2.2.2. Modèle du pseudo-second ordre	94
2.2.3. Modèle d'Elovich	95
2.2.4. Modèle de diffusion intraparticulaire	95
2.3. Étude des procédés d'adsorption	96
2.3.1. Adsorption discontinue	96
2.3.2. Adsorption continue	104
2.4. Éléments de dimensionnement	114
2.4.1. Résistance au transfert	114
2.4.2. Efficacité de plateau	115
2.4.3. Unité de transfert	115
3. Techniques et appareillages	116
3.1. Généralités	116
3.1.1. Choix d'un adsorbant	117
3.1.2. Divers procédés d'adsorption	118
3.2. Adsorption par contact et filtration	118
3.2.1. Principe	118
3.2.2. Appareillages	119
3.3. Adsorption par percolation	120
3.3.1. Configuration d'un adsorbant à lit fixe	120
3.3.2. Adsorption par percolation en lit fixe	121
3.3.3. Adsorption par percolation en lit mobile	123
3.4. Adsorption en lit fluidisé	125
3.5. Régénération des adsorbants	125
3.5.1. Différentes méthodes de régénération	125
3.5.2. Augmentation de la température	126
3.5.3. Abaissement de la pression totale	126
3.5.4. Abaissement de la concentration	127
3.6. Principaux procédés industriels	127
3.6.1. Procédés en phase gazeuse	127
3.6.2. Procédés en phase liquide	128
4. L'adsorption en 10 points	128

Chapitre 3. Échange d'ions

1. Généralités	131
1.1. Introduction	131
1.2. Définitions	131
1.2.1. Gonflement	131
1.2.2. Taux de pontage	132
1.2.3. Régénération	132
1.2.4. Sélectivité	132
1.2.5. Force ionique	132
1.2.6. Capacité d'échange	132
1.3. Caractéristiques d'un échangeur d'ions	132
1.3.1. Squelette	133
1.3.2. Groupements fonctionnels	133
1.3.3. Description de l'échange	133
1.4. Description du procédé	134
1.4.1. Saturation	134
1.4.2. Soulèvement	134
1.4.3. Régénération	135
1.4.4. Rinçage	135
1.5. Applications	135
1.5.1. Substitution	135
1.5.2. Séparation	135
1.5.3. Élimination	135
1.5.4. Réalisations	136
2. Notions théoriques	136
2.1. Structures et propriétés des échangeurs d'ions	136
2.1.1. Différents types de squelettes	137
2.1.2. Différents groupements fonctionnels	138
2.1.3. Propriétés des résines	142
2.1.4. Caractéristiques des résines	144
2.2. Étude thermodynamique de l'échange d'ions	147
2.2.1. Échange d'ions mono-monovalent	147
2.2.2. Échange d'ions mono-divalent	148
2.3. Étude cinétique de l'échange d'ions	148
2.3.1. Cas des résines fortement acides ou basiques	149
2.3.2. Cas des résines faiblement acides ou basiques	149
2.3.3. Fuite ionique et charge volumique	149
2.4. Étude des procédés d'échange d'ions	150
2.4.1. Propriétés de l'eau pure	150
2.4.2. Échange cationique	150
2.4.3. Échange anionique	151
2.4.4. Sélectivité des échangeurs d'ions	152
2.5. Éléments de dimensionnement	154
2.5.1. Volume de résine	155

2.5.2. Quantité de régénérant	155
2.5.3. Taux de régénération	155
3. Techniques et appareillages	155
3.1. Techniques générales	155
3.1.1. Choix des résines	155
3.1.2. Mise en œuvre des résines	156
3.2. Principaux appareils	158
3.2.1. Unités discontinues	159
3.2.2. Unités continues	163
3.2.3. Systèmes de contrôle	163
3.3. Exemples industriels de l'échange d'ions	164
3.3.1. Analyse d'eau	164
3.3.2. Traitement de l'eau potable	167
3.3.3. Conception d'une installation de traitement de l'eau	168
3.3.4. Industrie du sucre	169
3.3.5. Autres applications	171
4. L'échange d'ions en 10 points	172
Chapitre 4. Cristallisation	
1. Généralités	175
1.1. Introduction	175
1.2. Définitions	175
1.2.1. Définitions sur la solution	176
1.2.2. Définitions sur la composition	177
1.2.3. Définitions sur le procédé	178
1.3. Description du procédé	178
1.3.1. Divers modes de cristallisation	178
1.3.2. Cristallisation par refroidissement d'une solution	179
1.4. Applications	180
2. Notions théoriques	181
2.1. Étude thermodynamique de la cristallisation	181
2.1.1. Solubilité des composés	181
2.1.2. Diagramme de solubilité et de sursaturation	183
2.1.3. Déroulement de la cristallisation	187
2.1.4. L'état cristallin	190
2.2. Étude cinétique de la cristallisation	196
2.2.1. Nucléation	196
2.2.2. Croissance	198
2.2.3. Évolution des cristaux	201
2.3. Exploitation des données thermodynamiques et cinétiques	203
2.3.1. Principe de fonctionnement d'un cristalliseur MSMPR	203
2.3.2. Détermination de la densité de population d'une suspension	204

2.3.3. Obtention des données cinétiques	204
2.3.4. Modèles cinétiques pour une cristallisation amorcée	205
2.4. Étude des procédés de cristallisation	206
2.4.1. Cristallisation par refroidissement par échange thermique	206
2.4.2. Cristallisation par refroidissement par évaporation du solvant	207
2.4.3. Cristallisation par concentration par évaporation du solvant	208
2.4.4. Cristallisation par relargage par ajout d'un sel ou d'un tiers-solvant	210
2.4.5. Cristallisation par précipitation	210
2.5. Éléments de dimensionnement	210
2.5.1. Bilans en cristallisation discontinue	211
2.5.2. Bilans en cristallisation continue	213
2.5.3. Transferts thermiques	214
2.5.4. Agitation	215
3. Techniques et appareillages	215
3.1. Techniques générales	215
3.1.1. Généralités	215
3.1.2. Particularités des cristallisoirs	216
3.1.3. Conduite d'une cristallisation	220
3.2. Appareillages	224
3.2.1. Cristallisoirs à cuve agitée à double enveloppe	225
3.2.2. Cristallisoirs à lit fluidisé	227
3.2.3. Autres cristallisoirs	228
3.2.4. Choix de la technique	230
4. La cristallisation en 10 points	232
Chapitre 5 – Séchage des solides et déshydratation)	
1. Généralités	235
1.1. Introduction	235
1.2. Définitions	235
1.2.1. Humidité	235
1.2.2. Température	237
1.2.3. Enthalpie de l'air humide	238
1.3 Description du procédé	238
1.4. Applications	239
2. Notions théoriques	240
2.1. Étude thermodynamique du séchage	240
2.1.1. Diagramme de l'air humide	240
2.1.2. Caractérisation des solides humides	241
2.2. Étude cinétique du séchage	243
2.2.1. Vitesse de séchage	243
2.2.2. Courbes de séchage	244

2.3. Étude des procédés de séchage	247
2.3.1. Séchage par conduction	247
2.3.2. Séchage par convection	247
2.3.3. Séchage par rayonnement	248
2.3.4. Séchage sous pression réduite	248
2.4. Éléments de dimensionnement	249
2.4.1. Bilans massiques	249
2.4.2. Bilans thermiques	250
2.4.3. Transferts thermiques	251
2.4.4. Puissance fournie	253
3. Techniques et appareillages	253
3.1. Séchoirs par conduction	254
3.1.1. Séchoirs rotatifs à conduction interne	254
3.1.2. Séchoirs rotatifs à conduction externe	255
3.1.3. Séchoirs à cylindre chauffant	255
3.2. Séchoirs par convection	256
3.2.1. Séchage par lits léchés	256
3.2.2. Séchage par lits retournés	256
3.2.3. Séchage par lits traversés	257
3.2.4. Séchage par lits fluidisés	258
3.2.5. Séchage pneumatique	260
3.3. Séchoirs par rayonnement	261
3.4. Séchoirs sous pression réduite	261
3.4.1. Séchoir à tambour	261
3.4.2. Séchoir biconique	261
3.4.3. Séchoir-mélangeur	262
3.5. Sécurité du séchage	262
3.5.1. Explosions pendant le séchage	263
3.5.2. Moyens préventifs	263
4. Atomisation	263
4.1. Généralités	263
4.2. Notions théoriques	264
4.2.1. Principe de la technique	264
4.2.2. Avantages et inconvénients	264
4.2.3. Applications	265
4.2.4. Étapes de l'atomisation	265
4.2.5. Éléments de dimensionnement	267
4.3. Techniques et appareillages	269
4.3.1. Tour d'atomisation	270
4.3.2. Systèmes de pulvérisation	271
5. Sublimation-Lyophilisation	273
5.1. Généralités	273
5.1.1. Introduction	273
5.1.2. Lyophilisateur	274
5.1.3. Applications	274

5.2. Notions théoriques	275
5.2.1. Diagramme de l'eau pure	275
5.2.2. Mélanges complexes	276
5.2.3. Transferts de matière et d'énergie	276
5.3. Techniques et appareillages	277
5.3.1. Lyophilisation sous vide	277
5.3.2. Lyophilisation avec adsorbants	279
6. Le séchage et la déshydratation en 10 points	279

Seconde partie – Applications des opérations unitaires de séparation

Chapitre 6 – Extraction des solides et purification des solutions

1. Extraction solide-liquide	283
1.1. Extraction des produits minéraux	283
1.1.1. Extraction aqueuse d'un sel	283
1.1.2. Séparation de la chaux en suspension dans la soude	289
1.1.3. Extraction d'un soluté hydrosoluble à contre-courants	294
1.2. Extraction des produits végétaux	297
1.2.1. Extraction continue du sucre de betteraves à contre-courants	297
1.2.2. Extraction de l'huile d'une graine oléagineuse	300
1.2.3. Extraction des flocons de soja par l'hexane	305
1.3. Extractions diverses	309
1.3.1. Extraction de la cire du papier par un hydrocarbure	309
1.3.2. Lavage aqueux du fromage blanc	310
2. Adsorption	312
2.1. Adsorption des gaz	
2.1.1. Adsorption d'effluents gazeux industriels sur charbon actif	312
2.1.2. Adsorption de la vapeur d'eau par une zéolithe	313
2.1.3. Adsorption du n-butanol de l'air sur charbon actif	315
2.1.4. Adsorption du l'hexane de l'air sur charbon actif	318
2.1.5. Déshydratation de l'air sur gel de silice	319
2.2. Adsorption des solutés	324
2.2.1. Décoloration discontinue d'une solution aqueuse sur charbon actif	324
2.2.2. Décoloration d'une solution aqueuse sur charbon actif	325
2.2.3. Adsorption des sels de plomb par la sciure de pin	328
2.2.4. Purification de l'eau sur charbon actif	334

3. Échange d'ions	338
3.1. Adsorption des ions	
3.1.1. Détermination de la capacité limite d'échange des ions ammonium	338
3.1.2. Élimination des ions calcium et sulfate d'une eau	338
3.1.3. Régénération d'une colonne acide avec l'acide nitrique	340
3.1.4. Élimination des ions cuivriques sur résine	341
3.2. Déminéralisation de l'eau	346

Chapitre 7 – Traitement des solides

1. Cristallisation	349
1.1. Bilans massiques et thermiques	349
1.1.1. Cristallisation continue du sulfate de sodium décahydraté	349
1.1.2. Cristallisation du sulfate de fer II heptahydraté	351
1.1.3. Recristallisation discontinue de la glycine	353
1.1.4. Cristallisation discontinue d'un composé hydrophile	355
1.1.5. Cristallisation par évaporation continue du sulfate de sodium	359
1.1.6. Cristallisation continue du chlorure de potassium	362
1.2. Bilans de population et cinétique	363
1.2.1. Cristallisation de la glycine	363
1.2.2. Étude cinétique d'une cristallisation	366
1.2.3. Cristallisation continue du sulfate de potassium	368
2. Séchage et déshydratation	369
2.1. Notions élémentaires	369
2.1.1. Relation entre tension de vapeur, pression partielle et humidité	371
2.1.2. Utilisation du diagramme de Carrier	374
2.2. Séchage des poudres	374
2.2.1. Séchage par convection d'un solide organique	374
2.2.2. Puissance d'un séchoir à poudres	375
2.2.3. Séchage d'un matériau granulaire par convection	376
2.3. Séchage sur filtre	377
2.3.1. Séchage d'un solide sur un filtre sécheur	379
2.3.2. Séchage d'un solide sur un séchoir continu	379
2.4. Atomisation d'une solution aqueuse	380

Chapitre 8 –Extraction solide-liquide de produits d'origine végétale

1. Extraction solide-liquide discontinue de la protopine de la fumeterre	383
1.1. Généralités	383
1.1.1. Fumeterre	383
1.1.2. Protopine	384
1.1.3. Analyse des alcaloïdes et de la protopine	385

1.2. Étude cinétique de l'extraction de la protopine	385
1.2.1. Dosage de la protopine par CLHP	385
1.2.2. Facteurs influents de l'extraction de la protopine	386
1.2.3. Modélisation des paramètres influents	394
1.2.4. Modélisation cinétique	397
1.2.5. Modélisation diffusionnelle	402
2. Extraction solide-liquide continue des matières hydrosolubles de l'aubier de tilleul	404
2.1. Généralités	404
2.1.1. Aubier de tilleul	404
2.1.2. Caractérisation de la matière première	405
2.1.3. Utilisation en médecine populaire	405
2.1.4. Composition chimique	406
2.2. Étude cinétique de l'extraction des molécules hydrosolubles de la poudre	407
2.2.1. Facteurs influents de l'extraction aqueuse	407
2.2.2. Étude cinétique de l'extraction de la poudre	413
2.3. Extraction des molécules hydrosolubles des copeaux	422
2.3.1. Extraction discontinue avec un extracteur de type parfaitement agité	422
2.3.2. Extraction continue avec un extracteur de type de Smet	426
Chapitre 9 – Valorisation des produits végétaux par adsorption et échange d'ions	
1. Adsorption des ions Pb²⁺ sur la sciure de <i>Pinus sylvestris</i>	435
1.1. Généralités	435
1.1.1. Plomb	435
1.1.2. Procédés de dépollution des eaux chargées en ions métalliques	437
1.1.3. Sciure de <i>Pinus sylvestris</i>	438
1.1.4. Caractérisation de l'adsorbant	439
1.2. Étude thermodynamique de l'adsorption des ions Pb ²⁺	440
1.2.1. Matériels et méthodes	440
1.2.2. Isothermes d'adsorption	441
1.3. Étude cinétique de l'adsorption des ions Pb ²⁺	452
1.3.1. Rappel des modèles cinétiques	452
1.3.2. Résultats expérimentaux	453
1.4. Applications à la dépollution d'un effluent industriel	456
1.4.1. Caractéristiques du réacteur continu	456
1.4.2. Modèle d'écoulement en dynamique	458
1.4.3. Matériel et méthodes	458
1.4.4. Épuration d'un effluent industriel à l'échelle pilote	464

2. Adsorption du phtalate de diéthyle sur charbon actif	466
2.1. Généralités	466
2.1.1. Phtalates	466
2.1.2. Charbons actifs	466
2.2. Caractérisation des charbons actifs	468
2.2.1. Propriétés chimiques	469
2.2.2. Propriétés texturales	470
2.3. Étude de la thermodynamique d'adsorption du phtalate de diéthyle	471
2.3.1. Rappels théoriques sur les isothermes	471
2.3.2. Méthodes	472
2.3.3. Résultats expérimentaux	473
2.3.4. Modélisation des isothermes	473
2.4. Étude de la cinétique d'adsorption du phtalate de diéthyle	476
2.4.1. Rappels théoriques	476
2.4.2. Méthodes	476
2.4.3. Résultats expérimentaux	477
2.4.4. Modélisation de la cinétique	478
3. Adsorption des composés colorés des vinasses sur charbon actif	480
3.1. Généralités	480
3.1.1. Betterave sucrière	480
3.1.2. Bioéthanol	481
3.1.3. Composés mineurs de la betterave sucrière	481
3.1.4. Bétaïne	482
3.1.5. Polysaccharides	483
3.1.6. Autres composés	483
3.2. Suivi analytique du procédé	483
3.2.1. Détermination du taux de matières sèches	483
3.2.2. Analyse du carbone organique total	484
3.2.3. Analyse de la bêtaïne	484
3.2.4. Analyse des composés phénoliques totaux	484
3.3. Purification des vinasses par adsorption du charbon actif	485
3.3.1. Traitements préalables des vinasses	485
3.3.2. Caractérisation des charbons actifs	486
3.3.3. Adsorption des composés colorés des vinasses sur charbon actif	488
4. Purification de la bêtaïne sur résine échangeuse d'ions	506
4.1. Généralités	
4.1.1. Méthodes d'analyse utilisées dans le procédé	507
4.1.2. Choix de la résine	507
4.2. Étude de la séparation de la bêtaïne	508
4.2.1. Dispositif expérimental	508
4.2.2. Facteurs influents de l'échange d'ions	508
4.3. Optimisation de la séparation de la bêtaïne par les plans d'expérience	512
4.3.1. Matériel et méthodes	512
4.3.2. Mise en place et résultats du plan d'expérience	512

Chapitre 10 – Cristallisation de la glycine

1. Précipitation de la glycine du milieu réactionnel	517
1.1. Généralités	517
1.1.1. Propriétés de la glycine	517
1.1.2. Synthèse de la glycine	517
1.2. Optimisation de la précipitation de la glycine	519
1.2.1. Courbes de solubilité et de sursaturation du milieu réactionnel	519
1.2.2. Courbes de solubilité de la glycine	523
1.2.3. Optimisation par la méthode du nombre d'Or	524
2. Etude cinétique de la recristallisation de la glycine	527
2.1. Généralités	527
2.1.1. Turbidimétrie	527
2.1.2. Unité de cristallisation	529
2.1.3. Détermination automatique du diagramme de solubilité	530
2.2. Recristallisation de la glycine dans l'eau par refroidissement contrôlé	532
2.2.1. Rappel des notions théoriques	532
2.2.2. Détermination des caractéristiques des cristaux	533
3. Détermination de la largeur de la zone métastable de la glycine dans l'eau	543
3.1. Généralités	543
3.2. Matériels et méthodes	544
3.2.1. Montage expérimental	544
3.2.2. Détermination des courbes de saturation et sursaturation apparentes	544
3.3. Résultats et discussion	545
3.3.1. Évolution de la température apparente de saturation en fonction de la vitesse de chauffage	545
3.3.2. Évolution de la température apparente de cristallisation en fonction de la vitesse de refroidissement	548
3.3.3. Détermination de la zone métastable	550
3.3.4. Cinétique de nucléation	551
3.3.5. Modélisation de la température de cristallisation	552

Annexes

1- Caractéristiques physiques des principaux solvants	555
2- Exemples de procédés industriels utilisant des adsorbants	559
3- Utilisations des résines échangeuses d'ions	560
4- Principaux fabricants de résines échangeuses d'ions	562
5- Solubilités des composés minéraux dans l'eau	563
6- Solubilités des composés organiques dans l'eau	565
7- Solubilités des acides aminés dans l'eau	566
8- Diagramme de l'air humide de Carrier	567
9- Diagramme de l'air humide (basses températures)	568
Bibliographie	569
Index des produits	575
Index des sujets	581

Procédés de séparation physicochimique des solides

À la fois traité de génie des procédés et manuel pratique, cet ouvrage présente, les notions fondamentales, les applications et des résultats de travaux de recherche de l'auteur sur les opérations de séparation équilibrées faisant intervenir un solide. Les opérations décrites concernent l'extraction solide-liquide, l'absorption des gaz et des solutions, l'échange d'ions, la cristallisation par refroidissement d'une solution, le séchage et la déshydratation. Cet ouvrage est composé de deux parties.

La partie théorique détaille les cinq opérations de séparation étudiées. Chaque chapitre est organisé de la même façon et traite les notions théoriques et les techniques et appareillages permettant de faire la séparation. La seconde partie comporte deux chapitres dédiés à la résolution détaillée de 22 exercices sur l'extraction des solides et la purification des solutions et 17 exercices sur le traitement des solides. Le chapitre 8 traite de l'extraction solide-liquide de la protopine de la fumeterre et des sucres réducteurs de l'aubier de tilleul. Le chapitre 9 se rapporte à la valorisation des produits végétaux pour l'adsorption des métaux lourds par la sciure de pin sylvestre, des phtalates ou des composés colorés par le charbon actif et la purification de la bêtaïne des vinasses de betteraves sur résine échangeuse d'ions. Le dernier chapitre se réfère à la cristallisation de la glycine synthétique et sa recristallisation améliorant à la fois la pureté et la granulométrie des cristaux.

Ce livre de 600 pages comporte 226 figures, 120 tableaux, 9 annexes et des index produits et sujets. Il constitue un support indispensable pour les étudiants et enseignants en génie des procédés et génie chimique des sections STS, IUT, masters professionnels et des écoles d'ingénieurs. Il sera également utile aux ingénieurs et techniciens souhaitant disposer de connaissances actualisées dans les domaines de la production et du R&D dans les diverses industries chimiques et parachimiques.

Henri Fauduet est ingénieur Cnam en chimie industrielle, docteur-ingénieur en chimie organique et habilité à diriger des recherches en génie des procédés. Il a acquis une expérience pluridisciplinaire dans plusieurs établissements comme chimiste organicien, ingénieur procédés, ingénieur méthodes puis comme maître de conférences et professeur des universités. Il a enseigné le génie des procédés pendant 25 ans à l'IUT d'Orléans et dans plusieurs écoles d'ingénieurs. Il a également dirigé une équipe de recherche spécialisée dans la valorisation non alimentaire des phytoressources. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages de génie des procédés.

Crédit photo: iStock

editions.lavoisier.fr



978-2-7430-2671-4