

CHAPITRE 1 : Absorption–Stripping(Désorption)

INTRODUCTION

Dans l'industrie chimique un procédé de fabrication peut être décomposé en une succession d'opérations qui constituent ses étapes clés. On distingue généralement le (ou les) réacteurs qui sont constitués par des enceintes dans lesquelles se déroulent les réactions chimiques, et les opérations de séparations qui sont destinées à séparer et purifier les constituants d'un mélange.

La séparation des constituants d'un mélange gazeux peut être réalisée par différentes méthodes telles que l'absorption, l'adsorption, la condensation précédée d'une compression ou encore la perméation sur membrane.

L'absorption est l'une des méthodes les plus fréquemment utilisées, de plus dans un certain nombre de cas le processus d'absorption est accompagné d'une réaction chimique en phase liquide.

Le principe fondamentale de toute opération unitaire est la mise en contact de phase en présence pour assurer le développement de la réaction, le mécanisme, le transport matière de chaleur et de quantités de mouvement qui ont lieu durant la chaîne de transformation ainsi que la séparation de constituants de mélange résultant, la démarche générale, adoptée pour toutes les opérations unitaires consiste en :

- La recherche des données d'équilibre
- L'établissement de bilans de matière et d'énergie
- Le dimensionnement de l'installation.

Ce chapitre d'opérations unitaires 1 est adressé aux étudiants inscrits en première année master de la filière de génie des procédés option génie chimique.

Généralités

L'absorption se définit simplement comme l'opération fondamentale de transfert dans un liquide d'un ou plusieurs constituants d'un gaz (ou d'une vapeur). On peut exprimer que c'est l'opération d'après laquelle un mélange de gaz (ou de vapeur) est mis en contact avec un liquide afin de séparer, par dissolution (ou absorption) dans celui-ci, un ou plusieurs constituants du mélange gazeux. Cette opération est souvent appelée : **lavage des gaz**. La récupération, souvent nécessaire, de la substance qui s'est dissoute dans le liquide, est appelée **désorption**. Les gaz à séparer peuvent être des produits utiles ou nuisibles que l'on désire éliminer d'un gaz porteur destiné à subir ensuite d'autres traitements. Ce substrat est souvent un gaz inerte, c'est-à-dire insoluble dans le liquide absorbant.

Termes utilisés

Le **soluté** ou **absorbât** est le gaz (ou la vapeur) contenu dans le gaz porteur, que l'on doit extraire par dissolution dans le liquide.

Le **diluant** ou **inerte** est le gaz (ou vapeur) mélangé au soluté. Il est souvent insoluble ou peu soluble dans le solvant.

Le mélange gaz entrant la colonne est appelé souvent : **gaz riche**.

Le gaz dépourvu plus ou moins complètement du soluté est appelé : **gaz épuisé**.

L'**absorbant** ou **solvant** est le liquide destiné à dissoudre le soluté.

La **solution** est le liquide obtenu par dissolution du soluté dans le solvant, elle porte également le nom de solution riche.

Les processus de dissolution d'un gaz dans un liquide sont de nature physique ou chimique

Solubilité

Lorsqu'un gaz est mis en présence d'un liquide, l'échange de matière entre phases correspondant à l'équilibre peut être supposé réalisé approximativement, après une durée plus ou moins longue suivant le système auquel on a affaire. Dans ces conditions, la connaissance des teneurs en constituants dans chaque phases (solubilités) et notamment de celle du gaz dans le liquide est particulièrement importante

Équilibre gaz- liquide

Les lois de *Dalton*, de *Henry* et de *Raoult* s'appliquent à l'étude théorique des équilibres liquide-gaz de certains mélanges particuliers. Elles relient les pressions partielles du système gaz-liquide à la teneur du gaz dans le solvant ou à sa pression maximale de vapeur.

Méthodes d'absorption

Les principales opérations peuvent être classées d'après le sens du déplacement des fluides, gaz et liquide, en deux catégories :

- L'absorption à co-courant .
- L'absorption à contre-courant.

Types d'absorption

Absorption physique

C'est une dissolution physico-chimique faisant appel aux phénomènes de solubilité gaz-liquide sans qu'il y ait aucune transformation chimique des constituants. Le processus d'absorption physique est préféré quand :

- le mélange de gaz d'alimentation et le constituant à absorber sont présents en grande quantité, à pression élevée ;
- la fraction de gaz non absorbée doit présenter une très grande pureté ;
- un ou plusieurs constituants absorbés sélectivement doivent être obtenus soit sous forme enrichie, soit sous forme pure ;
- le soluté doit faire l'objet d'une opération de synthèse ultérieure

Absorption chimique

Elle correspond à la dissolution d'un soluté dans un liquide avec formation d'un composé chimique plus ou moins stable. L'absorption présente certaines analogies, en ce qui concerne la nature des processus et de l'appareillage utilisé, avec d'autres opérations de transfert de matière telles que les extractions et la distillation. L'absorption par réaction chimique est adoptée si :

- la récupération du solvant n'exige pas une grande quantité d'énergie ;
- les constituants devant être séparés sont fortement acides et subissent une réaction thermique réversible avec le solvant ;
- les constituants à séparer à partir du mélange d'alimentation sont présents en faible concentration sous une basse pression.

Mécanisme d'absorption avec et sans réaction chimique

L'absorption et le stripping sont des OPU utilisés dans plusieurs procédés industriels surtout dans la purification des gaz en éliminant les impuretés. Son principe consiste à transférer un composé (un soluté A) faiblement concentré d'une phase gaz vers la phase liquide et vis-versa. dans la phase gaz ----- vers la phase liquide (absorption)

Le stripping (désorption) est le phénomène inverse dans la phase liquide ----- vers la phase gaz (stripping)

Ces deux OPU sont généralement successives pour régénérer la solution (solvant).

Exemple : Absorption du gaz CO₂ dans un flux d'air par une solution aqueuse de NaOH (soude liquide) est une absorption chimique.

Formulation théorique de l'équilibre liquide-gaz

Pour une faible concentration de soluté, la loi de Henry est employée pour exprimer l'équilibre entre les phases.

$$P_B = H_B x_B$$

P_B est la pression partielle du soluté B dans la phase gazeuse

x_B est la fraction molaire dans la phase liquide

H_B est la constante de Henry du soluté B

la fraction molaire du soluté B dans la phase gazeuse peut être décrite par équation:

$$y_B = \frac{P_B}{P_{\text{total}}}$$

On obtient l'équation suivante :

$$y_B = \frac{H_B}{P_{\text{total}}} x_B$$

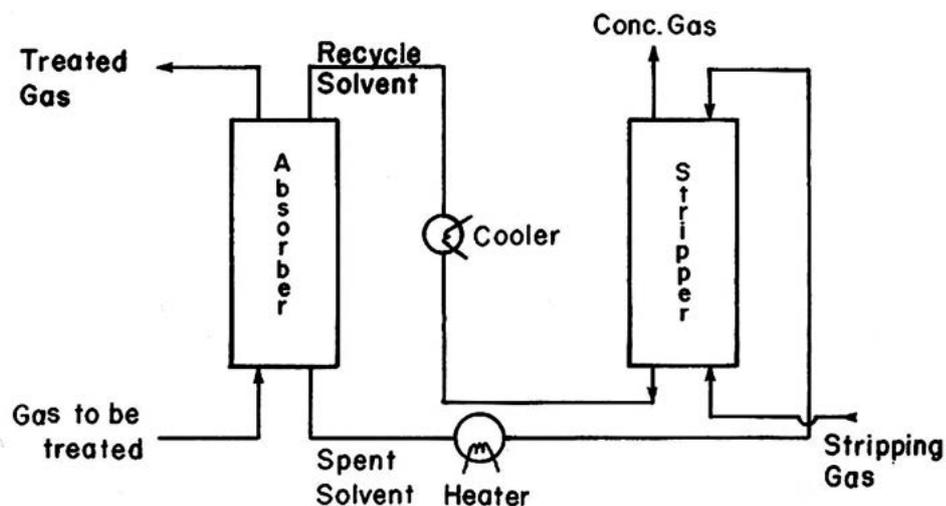
Equation de la courbe de distribution ou d'équilibre est une droite de la pente H_B/P_T est égale au coefficient de distribution ou d'équilibre K du soluté A à l'interface gaz- liquide. La solubilité du gaz augmente quand la P_B augmente est donc à la pression P_T la plus haute possible alors que la solubilité du soluté B dans le solvant liquide est plus grande que température est plus faible. Ces résultats physico-chimiques de l'équilibre gaz-liquide sont exploités et utilisés comme mode opératoire dans les contacteurs industriels gaz-liquide appelés absorbeurs et inversement dans les strippers (désorbeurs).

Couplage absorption et stripping

Dans la pratique industrielle, l'absorption est généralement jumelée à l'opération de **désorption**, laquelle est destinée à la récupération du soluté dissous dans le solvant et à la régénération de celui-ci afin de le faire entrer à nouveau en service.

L'opération inverse de l'absorption est la désorption ou dégazage (stripping). Elle consiste à éliminer les gaz (ou vapeurs) absorbés dans le liquide, c-à-d. qu'elle provoque le passage ou transfert des gaz du liquide dans un autre gaz (ou vapeur). Elle est réalisée, soit par mise en contact du liquide avec un gaz ou une vapeur qui sert d'agent de désorption, soit encore par chauffage en présence ou non de vapeur d'eau, lorsqu'on a affaire à une combinaison chimique du soluté avec l'absorbant. Lorsque l'absorbât doit être récupéré, ce qui est fréquemment le cas, l'opération de désorption suit celle d'absorption.

La désorption est généralement réalisée par chauffage de la solution ou par injection de vapeur dans celle-ci circulant dans le désorbeur, constitué par une colonne à plateaux ou à garnissage. Dans un système qui utilise le chauffage, les courants de gaz et de liquide cheminent à contre-courant; en tête du désorbeur, arrive la solution riche et sort le soluté gazeux tandis que l'on chauffe, à la base, pour éliminer l'absorbât de la solution. Le solvant est renvoyé dans l'absorbeur, après refroidissement, d'abord par échange thermique avec la solution à traiter (celle-ci parvient ainsi préchauffée au désorbeur), puis par un dispositif ordinaire de réfrigération.



Similaire à la distillation, l'absorption et le stripping sont opérés comme des opérations de phase d'équilibre, dans lequel le liquide et la vapeur sont en contact avec l'un l'autre. Cependant, les colonnes d'absorption et de stripping sont plus simples que les colonnes de distillation; normalement, ils n'ont pas besoin de condenseurs et réchauffeurs. Un exemple, des utilisations de l'absorption et de stripping est illustrée à la figure ci-dessus.

Le mélange des gaz (c'est-à-dire le gaz à traiter sur la figure), dont un composant (par exemple, CO₂ ou H₂S) dans le mélange gazeux doit être enlevé, est passé à travers un absorbeur, dans lequel un solvant en phase liquide (par exemple, MEA ou solvant amine dans l'eau) est passé, pour absorber le composant gazeux (CO₂ ou H₂S)

Le composant qui doit être éliminé est mélangé (physiquement ou chimiquement) avec le solvant

Le solvant résultant est chauffé par un réchauffeur et devient saturé. Le solvant saturé résultant est, par la suite, passé dans une colonne de stripping, dans lequel le composant gazeux dans le solvant saturé est enlevé par un gaz d'extraction (par exemple, vapeur).

Détermination des éléments d'absorption simples

La mise en œuvre d'une absorption exige généralement la détermination de la quantité de solvant (débit) et des caractéristiques de l'appareillage (type et dimensions) pour traiter une certaine quantité de gaz chargé en soluté (débit et composition connus), en vue d'obtenir un gaz appauvri en absorbât (composition déterminée en soluté). On peut encore vouloir connaître la teneur en soluté du gaz effluent et les caractéristiques de l'appareillage pour traiter une certaine quantité de gaz de composition connue en soluté par une certaine masse de solvant (débits imposés en gaz et en solvant).

La connaissance des caractéristiques d'un absorbeur est la partie essentielle de la mise en œuvre d'une opération. Pour l'absorption continue à contre-courant dans des colonnes cylindriques à plateaux ou à garnissage, il est nécessaire d'évaluer, soit le nombre de plateaux, soit la hauteur du garnissage, puis le diamètre et les pertes de charge.

L'absorption et le décapage impliquent au moins 3 composants et 2 phases. En général, pour simplifier, nous supposons souvent que Suivant:

- Le gaz vecteur est insoluble (dans un solvant)
- Le solvant est non volatil (ainsi, la perte de solvant dû à la vaporisation est négligeable)
- Le système est isotherme (température constante et isobare (pression constante))

Puisque le système d'absorption ou de décapage comprend 3 espèces et 2 phases, le degré de liberté (F), calculé en utilisant la règle de phase de Gibbs, est

$$F = C - P + 2 = 3 - 2 + 2 = 3$$

Comme nous supposons que le système est

- isotherme, ce qui se traduit par le fait que la température du système est constante
- isobare, ce qui se traduit par le fait que la pression du système est constante

le degré de liberté (F) est réduit à un (1). Normalement, la courbe d'équilibre est utilisée comme degré de liberté restant. En général, la quantité de soluté (c'est-à-dire un gaz à être retiré du mélange gazeux) est relativement faible.

Contacteurs gaz-liquide

Le phénomène physique qui régit l'absorption est la diffusion à contre-courant qui s'instaure entre la phase liquide et la phase gazeuse. Les transferts de matière et de chaleur s'établissent au moyen de dispositifs de contact qui engendrent de grandes surfaces d'échange entre les deux phases.

Bien que dans certains cas particuliers on utilise un équipement spécifique (Venturi pour le lavage de gaz chargés en poussières ou colonnes à film pour les réactions très exothermiques par exemple) afin de garantir une certaine efficacité, la tendance actuelle va à l'utilisation d'éléments très semblables à ceux décrits pour la distillation : colonnes à plateaux ou colonnes à garnissage, qui doivent permettre un contact intime du gaz et du liquide.

Choix du solvant d'absorption

Si le but de l'opération est de produire une solution spécifique, par exemple la fabrication d'acide chlorhydrique, le solvant est spécifié par la nature du produit. Par contre, si le but recherché est de récupérer ou éliminer un constituant d'un mélange gazeux, alors plusieurs choix sont possibles. Dans ce cas, quelques caractéristiques du solvant sont à prendre en considération.

- Solubilité : sélectivité de l'absorbât, la plus grande possible
- Faible volatilité (pour ne pas être entraîné)
- Faible viscosité (augmentation de la vitesse d'absorption, écoulement plus rapide) puisqu'un solvant moins visqueux est préféré dans le but d'éviter l'engorgement et la chute de pression dans le dispositif de pompage.
- Peu corrosif pour les matériaux
- Non inflammable Peu altérable
- Bas point de congélation
- Prix peu élevé.

Influence de quelques paramètres

Température

la solubilité d'un gaz décroît quand la température augmente.

Nature du soluté

on note généralement une augmentation de la solubilité avec une augmentation de la température critique.

Solubilité

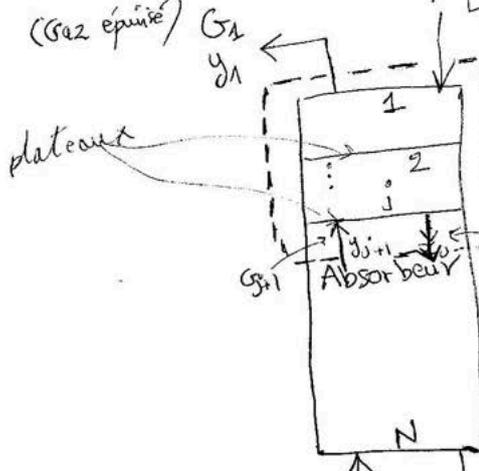
La solubilité augmente avec la pression partielle du soluté.

Absorption d'un seul composant

Lignes opératoires pour absorption :

Avoir une ligne opératoire linéaire (droite), il est nécessaire que :

= les débits de liquide et de gaz sont constants.
(Gaz épuisé) G_1 y_1 L_0, x_0 (Solvant)



Bilan de matière global aux limites

$$G_{j+1} y_{j+1} + L_0 x_0 = G_1 y_1 + L_j x_j \quad (1)$$

Bilan de matière partiel en soluté

$$G_{j+1} y_{j+1} + L_0 x_0 = G_1 y_1 + L_j x_j \quad (2)$$

$$y_{j+1} = \frac{L_j}{G_{j+1}} x_j + \frac{G_1 y_1 - L_0 x_0}{G_{j+1}} \quad (3)$$

ligne opératoire

(Gaz riche) G_{N+1}, y_{N+1} L_N, x_N (Solutés riches)

G_1, G_2, \dots, G_{N+1} : débits de gaz

L_0, L_1, \dots, L_N : débits de liquide

y_1, y_2, \dots, y_{N+1} : fractions molaire au mélange gazeux sans le mélange gazeux.

x_0, x_1, \dots, x_N : fractions molaires au mélange liquide dans le liquide.

* pour solutions diluées (faible concentration) \rightarrow $\begin{cases} L_0 \approx L_1 \approx \dots \approx L_N = L \\ G_1 \approx G_2 \approx \dots \approx G_{N+1} = G \end{cases}$

l'équation (3) devient :

$$y_{j+1} = \frac{L}{G} x_j + \frac{G y_1 - L x_0}{G} \quad (4)$$

droite de pente $\left(\frac{L}{G}\right)$

* pour fortes concentrations, nous ne pouvons plus faire l'hypothèse que les débits de gaz et de liquides sont constants tout au long de la colonne d'absorption. Ainsi $L_0 \neq L_N$ et $G_1 \neq G_{N+1}$

Equation (1) : $G_{j+1} y_{j+1} + L_0 x_0 = G_1 y_1 + L_j x_j$ ∴

debit de gaz inerte est constant (G') ∴

$$G' = G_1(1-y_1) = G_{j+1}(1-y_{j+1}) = \dots = G_N(1-y_{N+1})$$

$$G_{j+1} = \frac{G'}{1-y_{j+1}} \quad (5)$$

de même, debit du solvant est constant (L') ∴

$$L' = L_0(1-x_0) = L_j(1-x_j) = \dots = L_N(1-x_N)$$

$$L_j = \frac{L'}{1-x_j} \quad (6)$$

Equation (2) devient :

$$\frac{G' y_{j+1}}{1-y_{j+1}} + \frac{L' x_0}{1-x_0} = \frac{G' y_1}{1-y_1} + \frac{L' x_j}{1-x_j}$$

ou

$$G' Y_{j+1} + L' X_0 = G' Y_1 + L' X_j$$

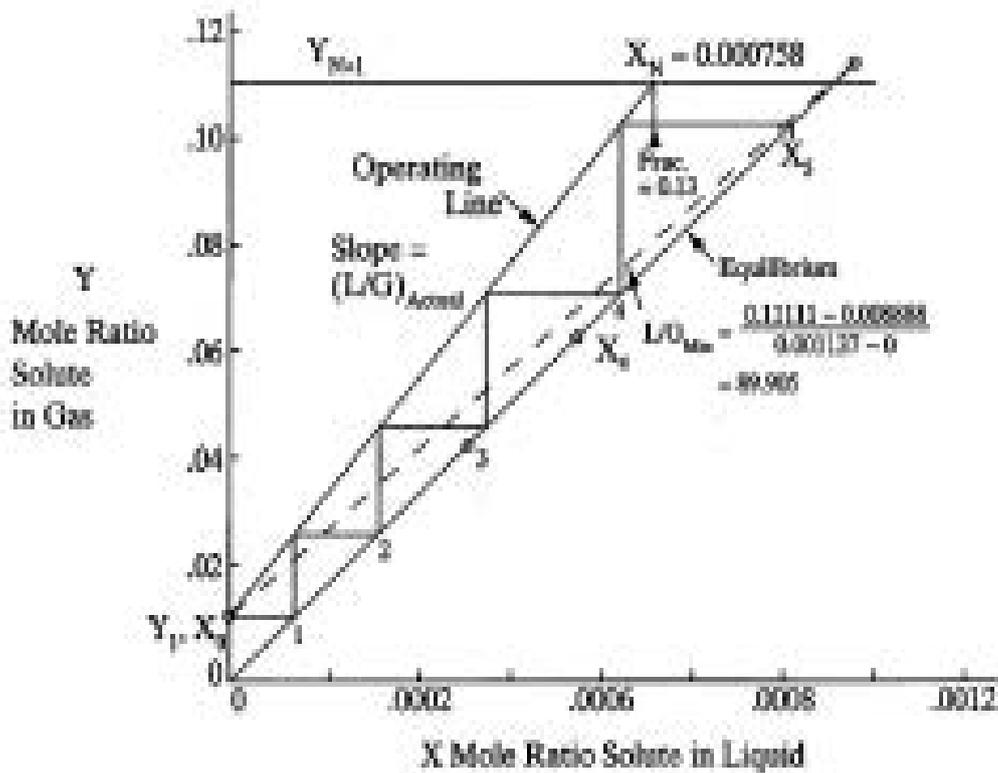
$$Y_{j+1} = \frac{L'}{G'} X_j + \frac{G' Y_1 - L' X_0}{G'} \quad (7)$$

il en résulte :
 ligne opératoire (droite)

$$\frac{L'}{G'} = \frac{Y_{j+1} - Y_1}{X_j - X_0} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_N - X_0} \quad (8)$$

Tracet de la methode de McCabe-Thiele :

- 1 / Traçons sur un papier millimétré la droite d'équilibre $y=K.x$
- 2 / Traçons la droite opératoire dont l'origine le point (x_0, y_1) du plateau de tête de colonne reliant le second point (x_n, y_{n+1}) du plateau de bas de colonne. Les valeurs de x_0, y_{n+1}, y_1 , et L/G sont généralement connues.
3. Localiser le point (x_0, y_1)
4. Traçons la droite horizontale passant de (x_0, y_1) vers la droite d'équilibre $y=K.x$ au point (x_1, y_1) .
4. Traçons la droite verticale qui commence du point (x_1, y_1) vers la droite opératoire (x_1, y_2) et ainsi de suite jusqu'au point (x_n, y_{n+1}) et le nombre de droite horizontales représente le nombre de plateaux ou étages théoriques.
5. Le taux des débits liquide et gazeux $(L/G)_{min}$ est égal à la pente de la droite opératoire minimale reliant le point (x_{n+1}, y_{n+1}) au point $P(x_0, y_1)$.



Détermination graphique du nombre de plateaux théoriques dans une colonne d'absorption par la méthode de McCabe-Thiele .

La ligne opératoire dans le diagramme de McCabe-Thiele pour l'absorption est dessus de la ligne d'équilibre. Ceci est parce que le soluté est transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide.

La ligne pointillée a pour pente $(\frac{L}{G})_{\text{minimal}}$

Il est important de noter que, si le système est non isotherme (comme dans le cas de la distillation) la ligne opératoire est toujours linéaire, mais la ligne d'équilibre n'est plus linéaire.

L'exemple suivant montre comment peut-on calculer le nombre de plateaux théorique pour l'absorption.

Exemple :

Un mélange gazeux contenant 90 mol% N_2 et 10% CO_2 est passé à travers un absorbeur, dans lequel l'eau pure à $5^\circ C$ est utilisée comme solvant.

L'opération est supposée isotherme à $5^\circ C$ et isobare à 10 atm.

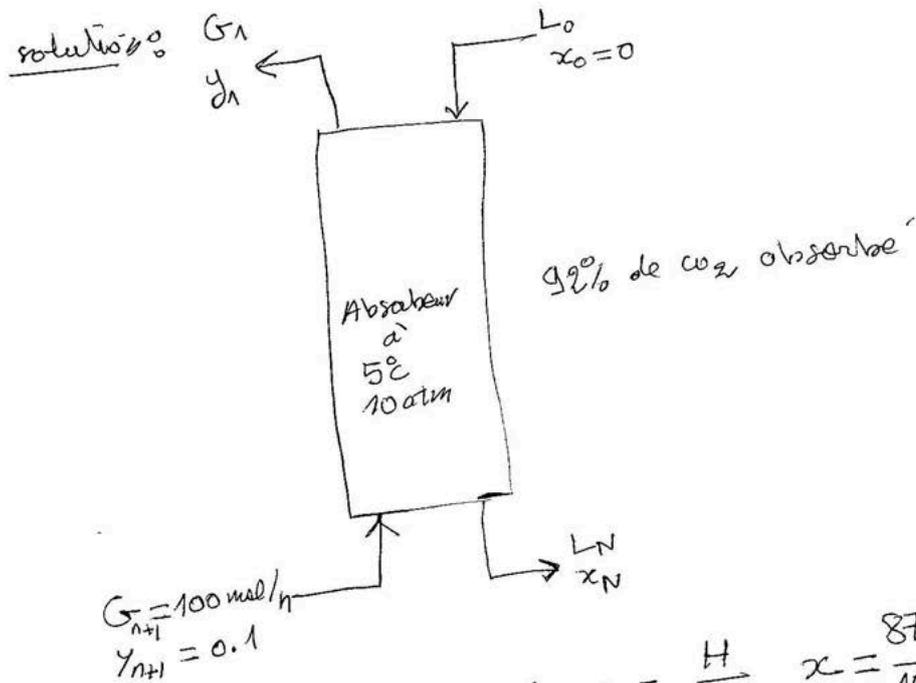
$(\frac{L}{G})_{\text{minimal}}$ est égal à

$$1.5 \times (\frac{L}{G})_{\text{min}}$$

Déterminer le nombre de plateaux nécessaires pour absorber 99 mol% de CO_2 .

La constante de Henry de CO_2 dans l'eau à $5^\circ C$ est 876 atm / fraction molaire.

Le débit du mélange gazeux entrant l'absorbeur est 100 mol/h.



L'équation d'équilibre est :

$$y = \frac{H}{P_{total}} x = \frac{876}{10} x$$

$$y = 87.6 x$$

x	y
0	0
0.0001	0.00876
0.0004	0.0350
0.0006	0.0526
0.0008	0.0701
0.0010	0.0876
0.0012	0.1051

$X = \frac{x}{1-x}$	$Y = \frac{y}{1-y}$
0	0
0.0001	0.00884
0.0004	0.0363
0.0006	0.0555
0.0008	0.0754
0.0010	0.0960
0.0012	0.1175

pour toutes concentrations, la ligne opératoire est :

$$Y_{j+1} = \frac{L'}{G'} X_j + Y_1 - \frac{L'}{G'} X_0$$

où

$$L' = L_N(1 - x_N) = L_0(1 - x_0)$$

$$G' = G_{N+1}(1 - y_{N+1}) = G_1(1 - y_1)$$

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} ; X_0 = \frac{x_0}{1 - x_0}$$

$$X_j = \frac{x_j}{1 - x_j} ; Y_{j+1} = \frac{y_{j+1}}{1 - y_{j+1}}$$

$$G' = G_{N+1}(1 - y_{N+1}) = 100(1 - 0.1) = 90 \text{ mol/h}$$

$$\boxed{G' = 90 \text{ mol/h}}$$

$$Y_{N+1} = \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} = \frac{0.1}{1 - 0.1} = 0.11$$

$$\boxed{Y_{N+1} = 0.11}$$

$$Y_1 = \frac{y_1}{1 - y_1} ; y_1 = \frac{10 \text{ mol/h} \times 0.08}{90 + 0.8} = 0.00881$$

$$Y_1 = \frac{0.00881}{1 - 0.00881} = \boxed{0.0089}$$

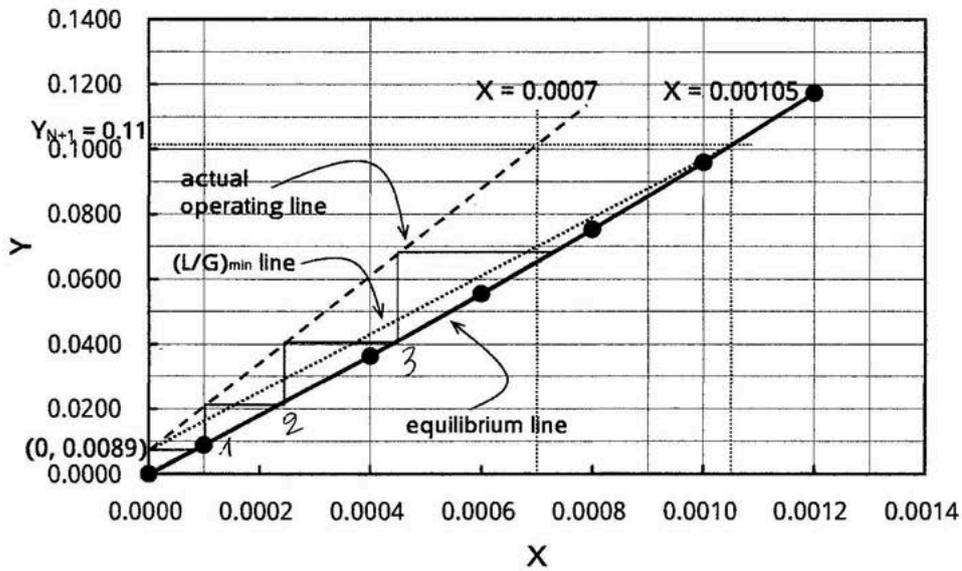
$$X_0 = \boxed{0}$$

$$\left(\frac{L'}{G'}\right)_{\min} = \frac{0.11 - 0.0089}{0.00105 - 0} = \boxed{96.3}$$

↑
pente de la ligne pointillée

$$\left(\frac{L'}{G'}\right) = 1.5 \left(\frac{L'}{G'}\right)_{\min} = 1.5 \times 96.3 = \boxed{144.5}$$

↑
pente de la ligne opératoire



$$\text{pente} = \frac{0.11 - 0.0089}{X_N - 0} = 144.5$$

$$X_N \approx 0.0007$$

$$\text{Nombre de plateaux th\u00e9oriques} = 3.8$$

Exercice :

On veut absorber 90% d'acétone (A) dans un mélange gaz (acétone + air) contenant 1 mol% (acétone). Le débit de gaz entrant l'absorbeur à contre-courant est de 30 mol/h et le débit du solvant pur (eau) qui entre l'absorbeur est de 90 mol/h.

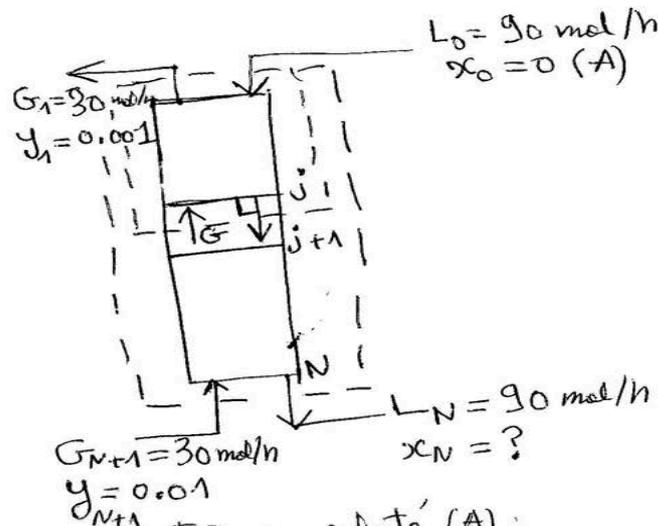
La relation d'équilibre pour l'acétone est $y_A = 2.53x_A$

$T = 300\text{K}$ et $P_T = 101.3\text{ kPa}$

On suppose que la concentration d'Acétone dans le mélange gaz est faible.

Déterminer le nombre de plateaux théoriques

Solution



* Bilan de matière en soluté (A) :

$$G_{N+1} y_{N+1} + L_0 x_0 = G_1 y_1 + L_N x_N$$

$$G_{N+1} = G_1 = 30 \text{ mol/h}$$

$$L_N = L_0 = 90 \text{ mol/h}$$

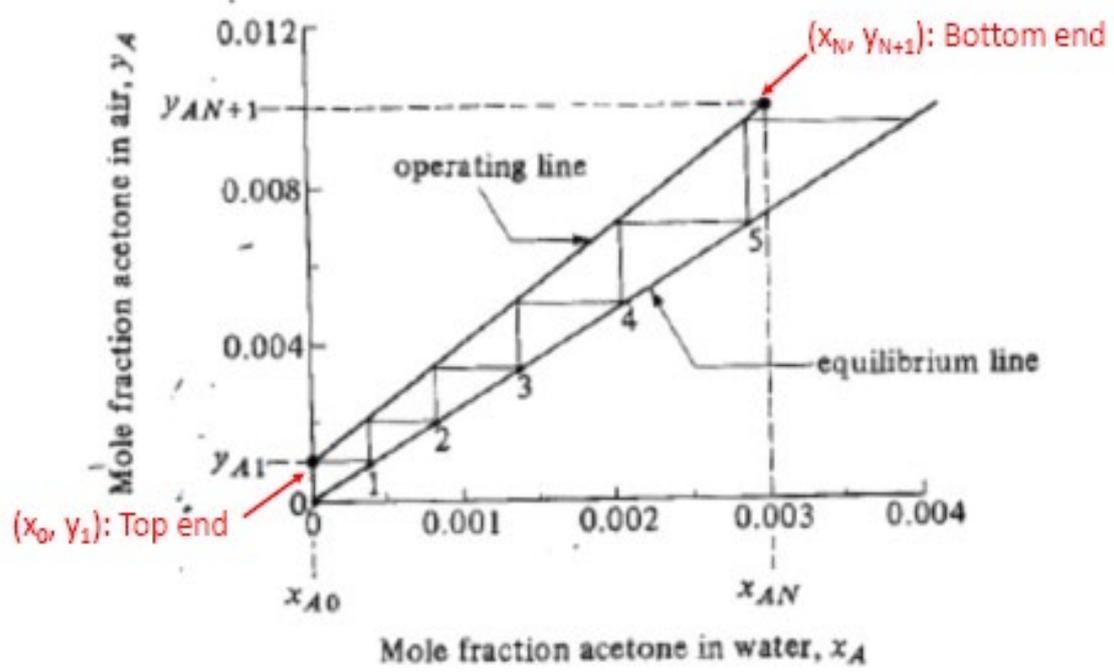
on tire $x_N = 0.003$

* Bilan de matière entre plateaux

$$G y + L x_0 = G y_1 + L x \Rightarrow$$

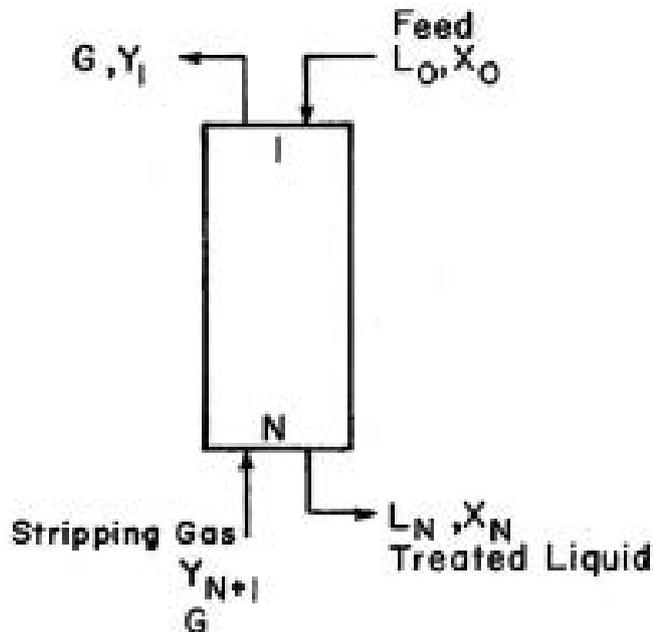
$$y = \frac{L}{G} x + \frac{y_1 G - x_0 L}{G}$$

→
Ligne opératoire donne $y = f(x)$ entre plateaux
c'est une droite car L et G sont constants



Nombre de plateaux théorique = 5.2

Analyse de la colonne de stripping (désorption)



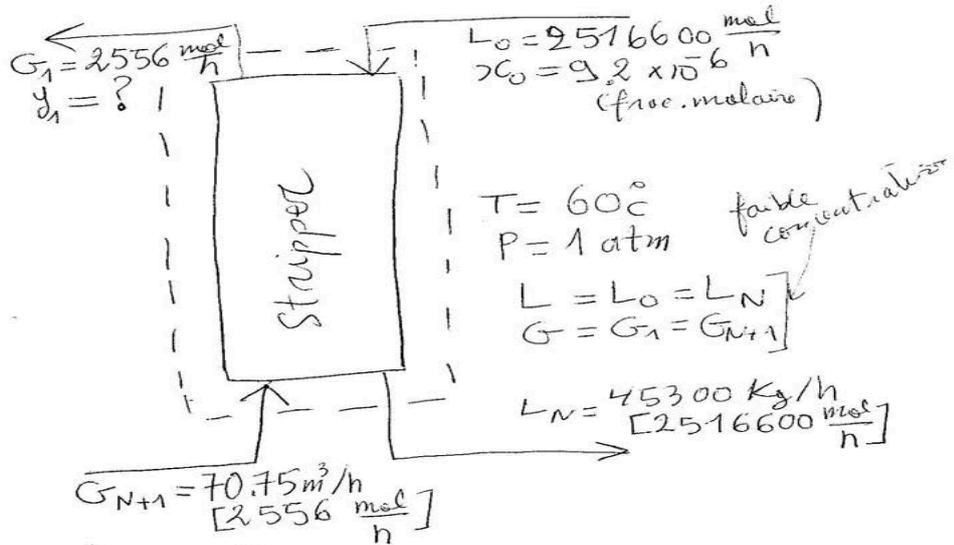
Le principe de stripping (désorption) consiste à transférer un composé (soluté) faiblement concentré d'une phase liquide vers la phase gaz. Les valeurs de x_0 , y_{N+1} sont normalement données. La valeur de x_N est généralement spécifiée et la valeur de L/G est donnée (soit directement ou indirectement). Cependant, on a besoin de calculer la valeur de y_1 .

La ligne opératoire est toujours la même que pour l'absorption.

A noter cependant l'opération de désorption est souvent non isotherme, de ce fait la ligne d'équilibre est normalement non linéaire.

Exemple : Nous voulons faire la conception d'une colonne de désorption (stripping) pour enlever le CO_2 contenu dans l'eau. Cela peut être fait en chauffant le mélange (eau + CO_2) et en le faisant passer à contre courant avec le gaz pur de N_2 dans une colonne de désorption. Le mélange (eau + CO_2) à l'entrée de la colonne contient $9.2 \cdot 10^{-6}$ (fraction molaire de CO_2) et son débit massique est 45300 Kg/h. Le gaz pur de N_2 entre la colonne avec un débit volumique de $70.75 \text{ m}^3/\text{h}$. La colonne fonctionne à $T = 60^\circ\text{C}$ et $P = 1 \text{ atm}$. La constante de Henry pour CO_2 dans l'eau à 60°C est $3410 \text{ atm}/(\text{frac. molaire})$. Si la fraction molaire de CO_2 dans le liquide à la sortie de la colonne est $2 \cdot 10^{-7}$. Trouver le nombre de plateaux théoriques

Solution



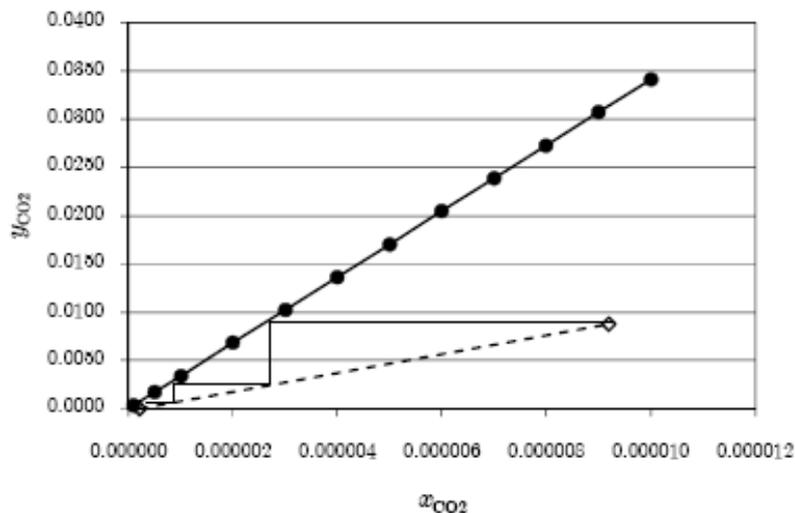
Bilan de matière pour toute la colonne :

$$G y_{N+1} + L x_0 = G y_1 + L x_N$$

$$y_1 = \frac{L}{G} [x_0 - x_N] = 0.00886$$

* La droite opératoire passe par les deux points $(x_N = 2 \times 10^{-7}, y_{N+1} = 0)$ et $(x_0 = 9.2 \times 10^{-6}, y_1 = 0.00886)$

* La droite d'équilibre est : $y = 3410 x$



Le nombre de plateaux théoriques est 3

Exercice 1: Absorption de CO₂ dans la solution eau-amine

Un gaz de combustion (22 kmol/s) d'une grande centrale au charbon contient 11.76% de CO₂ [mole-%], le reste est l'air. Nous voulons absorber 90% de CO₂ afin que le gaz traité à la sortie de la colonne d'absorption contienne 1.16% de CO₂. Le mélange gazeux et la solution liquide circulent à contre-courant. L'opération a lieu à 60 °C et 1.2 bar dans des conditions isothermes. La solution amine à l'entrée de la colonne contient 2.19% de CO₂ [provient de la colonne de désorption utilisée pour la régénération] et à la sortie de la colonne la solution liquide contient 5.32% de CO₂.

- Supposons que les débits des flux inertes pour air (G') et eau-amine (L') sont constants à travers la colonne. Trouver L', G', L₀, L_N et G₀
- Déterminer le nombre d'étages théoriques en utilisant la solution graphique de McCabe-Thiele

Les données d'équilibre de CO₂ et Eau-MEAmine à 1.2 bar et 60°C sont suivantes :

x _{CO2} (%)	2.227	3.001	3.339	4.101	4.700	5.324
y _{CO2} (%)	1.162	2.917	3.783	6.057	8.448	11.60

Exercice 2: Absorption de l'ammoniac

On envisage de procéder au lavage d'un mélange air-NH₃ en le faisant circuler à contre-courant, avec de l'eau pure, dans une colonne d'absorption à garnissage. L'opération a lieu à 10 °C et 1,013 bar dans des conditions isothermes. Le mélange gazeux chargé en NH₃ à un titre molaire de 8 % et l'air sortant de la colonne contient encore 0,2 % de NH₃. L'eau sortant de la colonne contient 7,3 % en NH₃ et l'air est insoluble dans l'eau. Le tableau suivant représente les rapports molaires relatifs à la courbe d'équilibre à 10 °C :

X	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
Y	0,0035	0,0085	0,0135	0,0185	0,0245	0,03	0,035	0,0415	0,0475	0,055

1. Tracer la ligne opératoire et la courbe d'équilibre à 10 °C
2. Déterminer le nombre d'étages théoriques (NET) nécessaire à l'opération d'absorption à 10 °C en utilisant la méthode graphique de MacCabe-Thiele

Solution Exercice 1 TD1

$$G_{N+1} = 22 \text{ kmol/s}$$

$$y_{N+1} = 0.1176 \text{ (fraction molaire de } \text{CO}_2\text{)}$$

$$y_1 = 0.0116; \quad x_0 = 0.0219; \quad x_N = 0.0532$$

$$\ast \quad G' = G_{N+1}(1 - y_{N+1}) = 19.41 \text{ kmol/s}$$

Bilan de matière sur toute la colonne pour CO_2 :

$$y_{N+1} G_{N+1} + x_0 L_0 = x_N L_N + y_1 G_1$$

$$\text{on a aussi: } G' = G_{N+1}(1 - y_{N+1}) \text{ et } L' = L_N(1 - x_N)$$

on obtient:

$$y_{N+1} \cdot \frac{G'}{1 - y_{N+1}} + x_0 \cdot \frac{L'}{1 - x_0} = x_N \cdot \frac{L'}{1 - x_N} + y_1 \cdot \frac{G'}{1 - y_1}$$

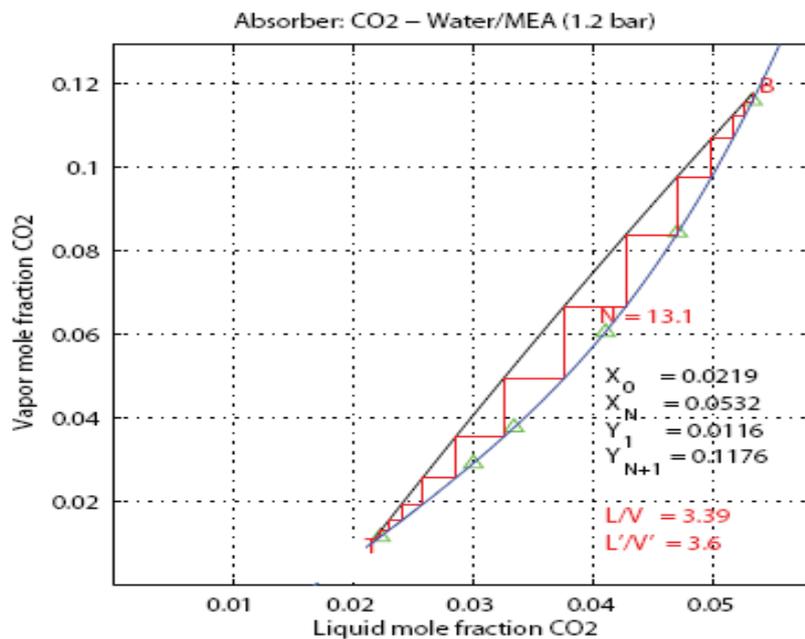
Dans cette équation, nous connaissons toute les variables sauf L' .

$$\frac{L'}{G'} = 3.596 \Rightarrow L' = 69.80 \text{ kmol/s}$$

$$\text{Donc } L_0 = L'(1 - x_0) = 71.36 \text{ kmol/s}$$

$$L_N = L'(1 - x_N) = 73.72 \text{ kmol/s}$$

\ast Est-ce que raisonnable d'utiliser la loi de Henry dans ce cas? Non, le rapport y/x varie de 0.52 à 2.18 dans l'intervalle de concentrations. A partir de diagramme, nous obtenons $N_{PT} = 13$



Absorption et Stripping (Désorption) TD2 Masster 1 GP

Exercice 1 : Absorption d'hydrogène sulfuré (H₂S)

On se propose d'épurer un effluent gazeux contenant du sulfure de dihydrogène en le faisant circuler à contre-courant, avec de l'eau, dans une colonne d'absorption à garnissage. L'opération a lieu à 20 °C et 1 atm dans des conditions isothermes. Le débit volumique d'air chargé en sulfure de dihydrogène est de 500 m³.h⁻¹ (à 0 °C et 1 atm) et son titre molaire est de 5%. Le gaz sortant de la colonne contient 0.12% de sulfure de dihydrogène (% volumique). Le débit massique de l'eau alimentant la colonne est de 500 kg.h⁻¹ et l'air est supposé être insoluble dans l'eau.

Etablir les bilans massiques et molaires en soluté dans les divers courants de la colonne.

Exercice 2 : Absorption d'acétone

Dans une colonne d'absorption à plateaux où un mélange gazeux composé d'azote et d'acétone (soluté) est mis en contact à contre courant avec l'eau liquide. Le débit molaire total du gaz entrant est égal à 30 kmol/h et le débit de l'eau liquide (solvant frais) entrant est égal à 90 kmol/h. La relation d'équilibre permettant de tracer la courbe ou droite d'équilibre est $y=Kx$ avec $K=2.5$. les valeurs en fraction molaire d'acétone respectives sont $X_0=0$; $X_N=4.68 \cdot 10^{-3}$; $Y_1=7.61 \cdot 10^{-4}$; $Y_{N+1}=0.015$ des fluides dans la colonne.

1. calculer le débit d'eau liquide minimum à partir du graphique par la méthode de McCabe-Thiele.
2. Déterminer le nombre de plateaux ou étages théoriques nécessaires pour effectuer cette opération d'absorption en utilisant la méthode graphique de McCabe-Thiele.

Solution Exercice 1 TD2

Exo 2:

- Bilan massique et molaire en soluté:

diluant: air

Solute: H_2S

Solvant: Eau.

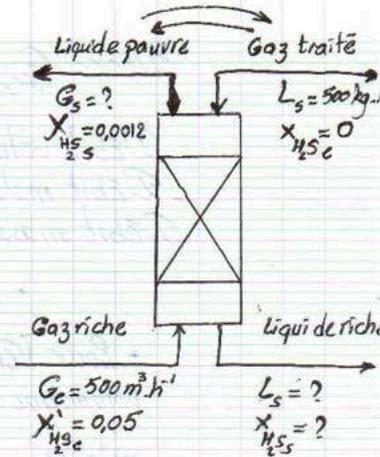
- Bilan de matière global:

$$L_e + G_e = L_s + G_s$$

- Bilan de matière en soluté:

$$L_c \cdot X_{H_2S_c} + G_c \cdot y_{H_2S_c} = L_s \cdot X_{H_2S_s} + G_s \cdot y_{H_2S_s} \quad (X_{H_2S_c} = 0)$$

$$G_c \cdot y_{H_2S_c} = L_s \cdot X_{H_2S_s} + G_s \cdot y_{H_2S_s}$$



I. A l'entrée:

a) Gaz riche: CNTP: 1 kmol \rightarrow 22,4 m³
 $G_c = 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Débit volumique)

- Débit volumique: $G_e = 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

- Débit molaire: $G_e' = \frac{G_e}{22,4} = \frac{500}{22,4} = 22,321 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$

- Débit massique: $G_e'' = M_{\text{moy}} \cdot G_e'$ ($M_{\text{moy}} = ?$ inconnue).

Pour le soluté H_2S :

- Débit molaire: $G_{H_2S}^i = X_{H_2S}^i \cdot G_e' = 0,05 \cdot 22,321 = 1,116 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$

- Débit massique: $G_{H_2S}^{ii} = M_{H_2S} \cdot G_{H_2S}^i = 34,1 \cdot 1,116 = 38,06 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

Nous savons que: $G_c = G_{\text{air}_c} + G_{H_2S_c}$

Donc: $G_{air_e} = G_e - G_{H_2O}$

- Débit volumique d'air: $G_{air_e} = 500 - 25 = 475 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 - Débit molaire d'air: $G'_{air_e} = 22,321 \times 0,95 = 21,205 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$
 - Débit massique d'air: $G''_{air_e} = M_{air} \times G'_{air_e} = 29 \times 21,205 = 614,94 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

* Pour vérifier les résultats obtenus, il faut que:

volumique: $G_e = G_{H_2O} + G_{air_e} = 475 + 25 = 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

molaire: $G'_e = G'_{H_2O} + G'_{air_e} = 1,116 + 21,205 = 22,321 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$

massique: $G''_e = G''_{H_2O} + G''_{air_e} = 38,06 + 614,94 = 653,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

b) **Liquide pauvre:** Puisque $x_{H_2O} = 0$, Alors: $x_{eau} = 1$
 Donc: $L''_{eau} = L''_e$

- Débit massique d' H_2O : $L''_{eau} = 500 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

- Débit volumique d' H_2O : $L_{eau} = 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

- Débit molaire d' H_2O : $L'_{eau} = \frac{L''_{eau}}{M_{H_2O}} = \frac{500}{18 \times 10^{-3}} = 27,77 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$

II. À la Sortie:

a) **Gaz pauvre (traité):** Puisque l'air est insoluble dans l'eau, don $C = G_{air_e} = G_{airs}$

Débit volumique d'air: $G_{airs} = x_{airs} \cdot G_s = (1 - x_{H_2S}) \cdot G_s$

$G_s = \frac{G_{airs}}{1 - x_{H_2S}} = \frac{475}{1 - 0,0012} = 475,57 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Alors: $G_{H_2S} = G_s - G_{airs} = 475,57 - 475 = 0,57 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

- Débit volumique en H_2S : $G_{H_2S} = 0,57 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$

- Débit molaire en H_2S : $G'_{H_2S} = \frac{0,57}{22,4} = 0,025 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$

- Débit massique en H_2S : $G''_{H_2S} = M_{H_2S} \cdot G'_{H_2S} = 34,1 \times 0,025 = 0,85 \text{ kg} \cdot h^{-1}$

b) **Liquide riche:**

D'après le bilan de matière en soluté (H_2S):

$$G_c \cdot y_{H_2S} = G'_s \cdot y'_{H_2S} + L'_s \cdot x_{H_2S}$$

ou bien: $G'_{H_2S} = G'_{H_2S} + L'_{H_2S} \Rightarrow L'_{H_2S} = G'_{H_2S} - G'_{H_2S}$

Donc: $L'_{H_2S} = 1,116 - 0,025 = 1,091 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$

- Débit molaire en H_2S : $L'_{H_2S} = 1,091 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$

- Débit volumique en H_2S : $L_{H_2S} = 1,091 \times 22,4 = 24,438 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$

- Débit massique en H_2S : $L''_{H_2S} = 34,1 \times 1,091 = 37,203 \text{ kg} \cdot h^{-1}$

* Pour le bilan en eau: $L_s = L_{H_2S} + L_{eau}$; ($L_{eau} = L_{eau}$)

- Débit volumique en H_2O : $L_{eau} = 500 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$

- Débit massique en H_2O : $L''_{eau} = 500 \text{ kg} \cdot h^{-1}$

- Débit molaire en H_2O : $L'_{eau} = 27,77 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$

Donc, pour le liquide riche total:

- Débit volumique: $L_g = L_{H_2S} + L_{eau} = 24,438 + 500 = 524,438 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$

- Débit molaire: $L'_s = L'_{H_2S} + L'_{eau} = 1,091 + 27,77 = 28,869 \text{ kmol} \cdot h^{-1}$

- Débit massique: $L''_s = L''_{H_2S} + L''_{air} = 37,203 + 500 = 537,203 \text{ kg} \cdot h^{-1}$

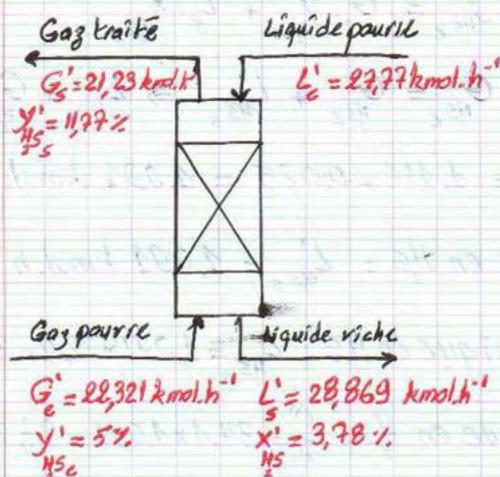
(5)

fraction de H_2S dans le liquide riche:

$$x'_{H_2S} = \frac{L'_{H_2S}}{L'_S} = \frac{1,091}{28,869} = 0,0378 = 3,78\%$$

fraction massique de H_2S dans le liquide riche:

$$x''_{H_2S} = \frac{L''_{H_2S}}{L''_S} = \frac{37,203}{537,203} = 0,0693 = 6,93\%$$



Calcul du rendement d'absorption ou:

$$\eta = \frac{L'_{H_2S}}{G'_{H_2S}} = \frac{L'_S - x'_{H_2S} L'_S}{G'_e - y'_{H_2S} G'_e}$$

A.N.s

$$\eta = \frac{28,869 \times 0,0378}{22,321 \times 0,05} = 0,978 = 97,8\%$$

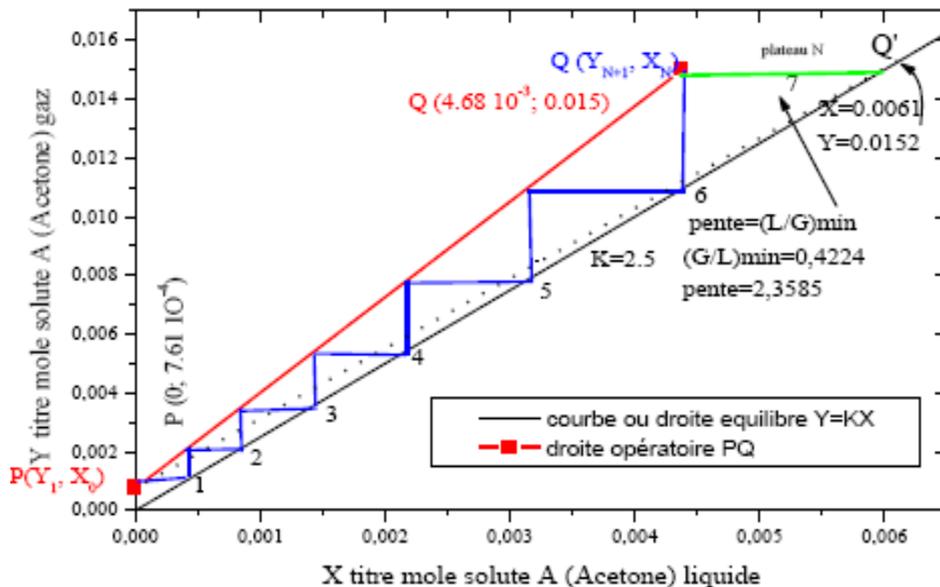
$$\boxed{\eta = 97,8\%}$$

(6)

Solution exercice 2 TD2

Dans une colonne d'absorption à plateaux où un mélange gazeux composé d'azote et d'acétone (soluté) est mis en contact à contre courant avec l'eau liquide. Le débit molaire total du gaz entrant est égal à 30 Kmol/h et le débit de l'eau liquide (solvant frais) entrant est égal à 90 Kmol/h. La relation d'équilibre permettant de tracer la courbe ou droite d'équilibre est $y=Kx$ avec $K=2.5$. les valeurs en fraction molaire d'acétone respectives sont $X_0=0$; $X_N=4.68 \cdot 10^{-3}$; $Y_1=7.61 \cdot 10^{-4}$; $Y_{N+1}=0.015$ des affluents et des effluents fluides dans la colonne.

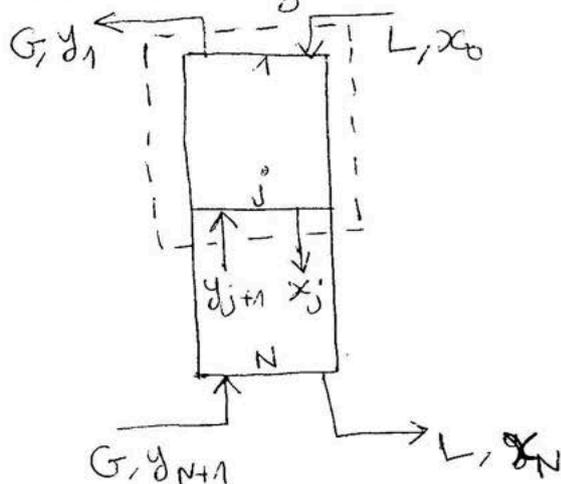
- Déterminer graphiquement la valeur de L_{min} par la méthode de McCabe & Thiele. La pente de la droite pseudo-opératoire PQ' est $(L/G)_{min}$ qui sera tracée sur papier millimétrique (voir figure ci-dessous) avec débit de gaz G constant et donc $(G/L)_{min} = G/L_{min} = (0,0061-0)/(0,0152-0,000761)=0,4224$ implique que $L_{min} = 30./0,42224=71,0114$ Kmol/h et on remplace le resultat de la question 3 dans la reponse de la question 2 et on obtient les resultats suivant : $A = (x \cdot 1,2 L_{min}) / G.y = 1,2 L_{min} / (2,5 \cdot 30) = 1,2 \cdot 71,0114 / 2,5 \cdot 30 = 1,1361$. $S=1/A=KG/L = 2,5 \cdot 30 / 1,2 L_{min} = 0,8801$.
- Détermination du nombre de plateaux ou étages théoriques nécessaires pour effectuer cette opération d'absorption en utilisant la méthode graphique de McCabe & Thiele en appliquant la procédure détaillée en cours. En traçant les droites horizontales et verticales soit en commençant du bas plateau 1, 2, 3 ect.. ou en partant du point Q' sur la droite d'équilibre entre cette dernière et la droite opératoire d'absorption jusqu'au point P , nous trouvons approximativement le nombre de plateaux théoriques $N_{PT} = 7$.



Calcul analytique du nombre de plateaux théoriques : Equation de Kremser

Solution analytique : Equations de Kremser.

quand la concentration d'un soluté dans les phases gaz et liquide est très faible ($< 1\%$), les débits de gaz et liquide ne changent pas de manière significative, même si le soluté est transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide. Ainsi, les fractions molaires de soluté dans les deux phases (x_i, y_i) peuvent être utilisées dans le calcul [ce n'est pas nécessaire de convertir x et y en X et Y].

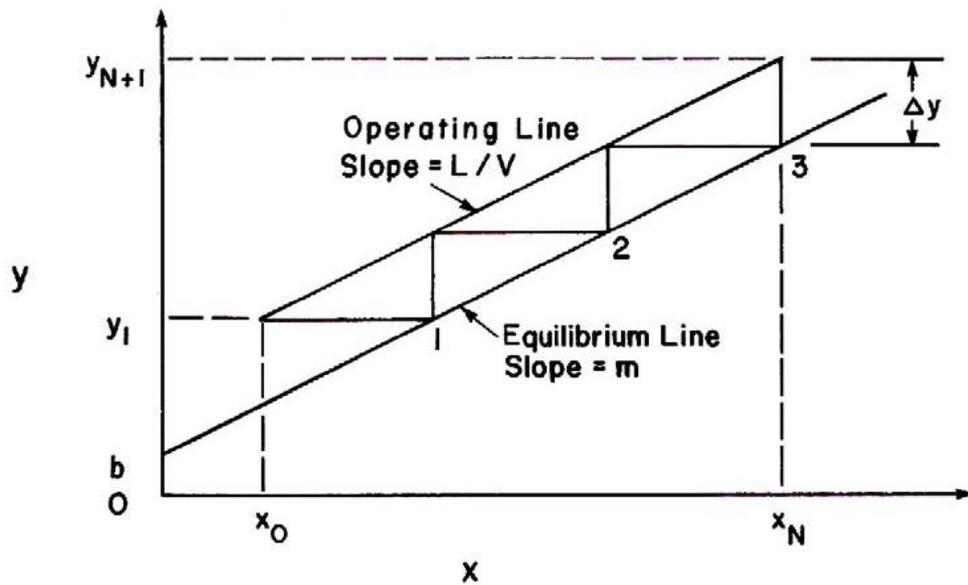


La ligne opératoire pour faible concentration

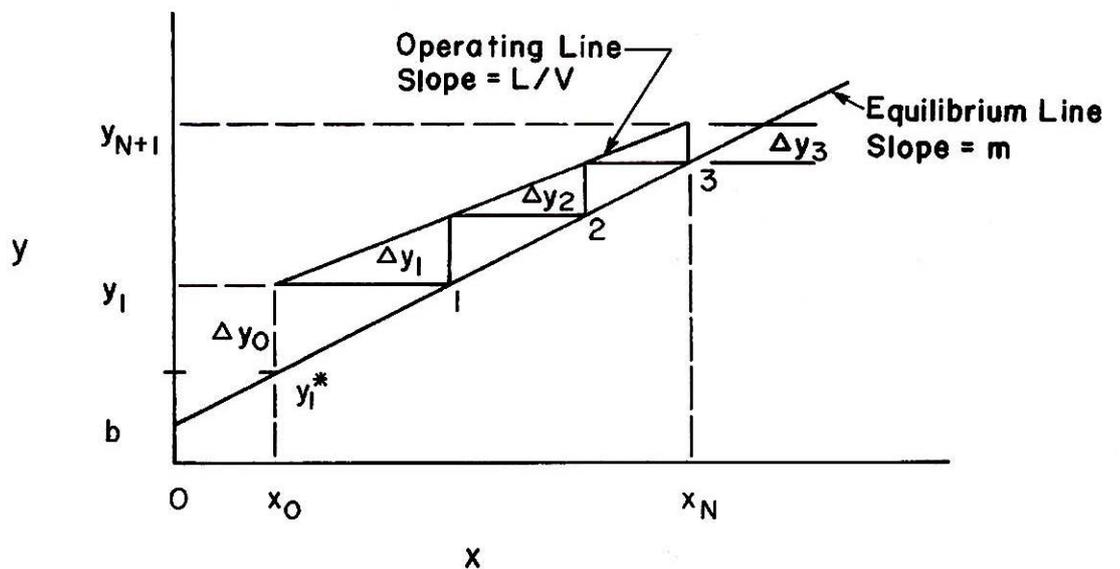
$$y_{j+1} = \frac{L}{G} x_j + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0 \right] \quad (1)$$

La courbe d'équilibre est linéaire :

$$y_j = m x_j \quad \text{avec} \quad m = \frac{H}{P_{\text{Total}}} \quad (2)$$



Opération d'absorption dans le cas où les lignes opératoire et d'équilibre sont parallèles



Opération d'absorption dans le cas où les lignes opératoire et d'équilibre ne sont pas parallèles

La solution analytique pour l'opération d'absorption
on a deux cas :

1- les deux lignes (opérateur et d'équilibre)
sont parallèles $\left[\frac{L}{G} = m\right]$

2- $\frac{L}{G} < m$

1. cas où $\frac{L}{G} = m$

$$y_{N+1} - y_1 = N \Delta y \text{ et } \Delta y = y_{j+1} - y_j \quad (3)$$

$$\Delta y = \frac{L}{G} x_j + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0\right] - m x_j \Rightarrow$$

$$\Delta y = \left[\frac{L}{G} - m\right] x_j + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0\right] \quad (4)$$

Comme dans notre cas $m = \frac{L}{G}$, l'équation (4)

devient :

$$\Delta y = y_1 - \frac{L}{G} x_0 = \text{constante} \quad (5)$$

Donc

$$y_{N+1} - y_1 = N \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0\right] \Rightarrow$$

$$N = \frac{y_{N+1} - y_1}{y_1 - \frac{L}{G} x_0} \quad (6)$$

L'équation (6) est un cas spécial pour l'équation
de Kremser quand $m = \frac{L}{G}$.

2. cas où $\frac{L}{G} < m$

Δy varie d'un plateau à l'autre

$$y_j = m x_j \Rightarrow x_j = \frac{y_j}{m} \quad (7)$$

On substitue l'équation (7) dans l'équation (4)
on obtient :

$$(\Delta y)_j = \left[\frac{L}{mG} - m \right] \cdot \frac{y_j}{m} + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0 \right]$$

$$(\Delta y)_j = \left[\frac{L}{mG} - 1 \right] y_j + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0 \right] \quad (8)$$

et

$$(\Delta y)_{j+1} = \left[\frac{L}{mG} - 1 \right] y_{j+1} + \left[y_1 - \frac{L}{G} x_0 \right] \quad (9)$$

$$\text{Eq. (9)} - \text{Eq. (8)} \Rightarrow \left[\frac{L}{mG} - 1 \right] y_{j+1} - \left[\frac{L}{mG} - 1 \right] y_j = (\Delta y)_{j+1} - (\Delta y)_j$$

$$(\Delta y)_{j+1} = \frac{L}{mG} (\Delta y)_j \quad (10)$$

avec $\frac{L}{mG} = A$ (absorption
facteur)

Comme Δy n'est pas constant, donc :

$$y_{N+1} - y_1 = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \dots + \Delta y_N \quad (11)$$

En utilisant l'équation (10), on obtient :

$$(\Delta y)_2 = \frac{L}{mG} (\Delta y)_1 ; (\Delta y)_3 = \frac{L}{mG} (\Delta y)_2, \dots \quad (12)$$

On substitue les equations (12) dans l'equation (11)
On obtient:

$$y_{N+1} - y_1 = \left[1 + \frac{L}{mG} + \left(\frac{L}{mG}\right)^2 + \dots + \left(\frac{L}{mG}\right)^{N-1} \right] \Delta y_1 \quad (13)$$

serie geometrique de
raison $\left(\frac{L}{mG}\right)$

$$S_N = 1 + \left(\frac{L}{mG}\right) + \left(\frac{L}{mG}\right)^2 + \dots + \left(\frac{L}{mG}\right)^{N-1} \quad (a)$$

$$\left(\frac{L}{mG}\right) S_N = \left(\frac{L}{mG}\right) + \left(\frac{L}{mG}\right)^2 + \dots + \left(\frac{L}{mG}\right)^N \quad (b)$$

$$(a) - (b) \Rightarrow S_N - \left(\frac{L}{mG}\right) S_N = 1 - \left(\frac{L}{mG}\right)^N$$

$$S_N = \frac{1 - \left(\frac{L}{mG}\right)^N}{1 - \frac{L}{mG}}$$

L'equation (13) devient alors

$$y_{N+1} - y_1 = \frac{1 - \left(\frac{L}{mG}\right)^N}{1 - \left(\frac{L}{mG}\right)} \Delta y_1 \quad (14)$$

avec $(\Delta y)_1 = \frac{L}{mG} (\Delta y)_0$ où

$$(\Delta y)_0 = \Delta y (a' x = x_0) = y_1 - y_1^*$$

$$\Delta y_1 = \frac{L}{mG} [y_1 - y_1^*] \dots \dots (15)$$

$$y_1^* = m x_0 \quad (16)$$

L'équation (14) devient

$$\frac{y_{N+1} - y_1}{\frac{L}{mG} (y_1 - y_1^*)} = \frac{1 - \left(\frac{L}{mG}\right)^N}{1 - \left(\frac{L}{mG}\right)} \quad (17)$$

Eq. (17) \Rightarrow

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{mG}{L}\right) \left(\frac{y_{N+1} - y_1^*}{y_1 - y_1^*} \right) + \frac{mG}{L} \right]}{\ln \left(\frac{mG}{L} \right)} \quad (18)$$

Eq. (18) est une forme de l'équation de Kremser.

on a aussi :

$$N = \frac{\ln \left[\frac{(y_{N+1} - y_{N+1}^*)}{(y_1 - y_1^*)} \right]}{\ln \left[\frac{y_{N+1} - y_1}{(y_{N+1}^* - y_1^*)} \right]} \quad (19)$$

Exemple :

On veut absorber 90% d'acétone (A) dans un mélange gaz (acétone + air) contenant 1 mol% (acétone). Le débit de gaz entrant l'absorbeur à contre-courant est de 30 mol/h et le débit du solvant pur (eau) qui entre l'absorbeur est de 90 mol/h.

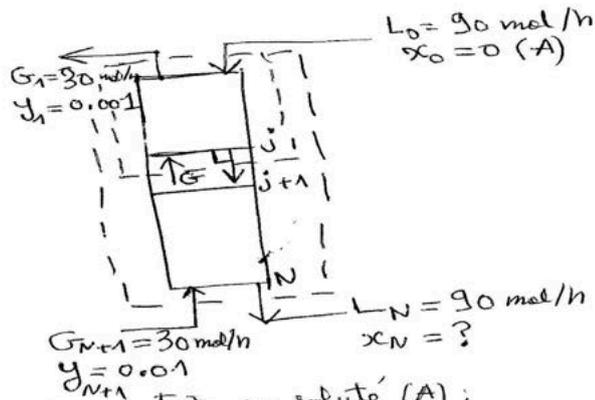
La relation d'équilibre pour l'acétone est $y_A = 2.53x_A$

$T = 300\text{K}$ et $P_T = 101.3\text{ kPa}$

On suppose que la concentration d'Acétone dans le mélange gaz est faible.

Déterminer le nombre de plateaux par la méthode de Kremser

Solution



* Bilan de matière en soluté (A) :

$$G_{N+1} y_{N+1} + L_0 x_0 = G_1 y_1 + L_N x_N$$

$G_{N+1} = G_1 = 30 \text{ mol/h}$ } faible concentration en soluté
 $L_N = L_0 = 90 \text{ mol/h}$

on tire $x_N = \boxed{0.003}$

* Bilan de matière entre plateaux

$$G y + L x_0 = G y_1 + L x \Rightarrow$$

$$y = \frac{L}{G} x + \frac{y_1(G - x_0 L)}{G}$$

Ligne opératoire donne $y = f(x)$ entre plateaux
 c'est une droite car L et G sont constants

Utilisons l'équation (19) $N = \frac{\log \left[\frac{y_{N+1} - y_{N+1}^*}{y_1 - y_1^*} \right]}{\log \left[\frac{y_{N+1} - y_1}{y_{N+1}^* - y_1^*} \right]}$

On obtient : $N = \frac{\log \left[\frac{0.01 - 2.53 \times 0.003}{0.001 - m \times 0} \right]}{\log \left[\frac{0.01 - 0.001}{2.53 \times 0.003 - m \times 0} \right]} = 5.13$

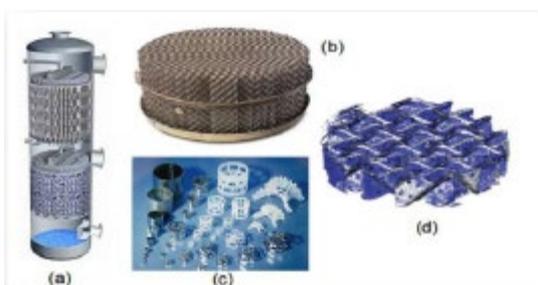
Avantages et inconvénients des colonnes à plateaux

- Chaque plateau peut être muni d'un serpentin et d'un échangeur de chaleur qui permet de récupérer les calories dégagées pendant l'absorption ;
- Elles offrent une assez grande efficacité d'absorption (la rétention du liquide est moyenne mais la surface de contact entre les deux phases est importante) ;
- Si des particules solides sont présentes dans le liquide, il sera préférable de choisir des colonnes à plateaux et particulièrement les plateaux perforés qui sont plus faciles à entretenir ;
- Généralement, les colonnes à plateaux sont conseillées pour les absorptions au cours desquelles le transfert de la matière est limité par la résistance de la phase liquide ;
- Pour les systèmes corrosifs, la construction de plateaux fera appel à des métaux résistants à la corrosion, généralement coûteux.

Colonnes à garnissages

La colonne à garnissage est sans doute le plus simple et le plus traditionnel des contacteurs gaz-liquide. En principe, il s'agit d'une colonne munie d'un plateau support, et remplie de garnissage de types très divers. Ces garnissages sont mis en place d'une manière aléatoire le plus fréquemment et parfois d'une manière ordonnée. Le liquide ruisselle par gravité le long de ce garnissage après avoir été distribué au moyen d'un plateau situé au sommet de la colonne. Le gaz circule généralement à contre-courant du liquide, quoique des réalisations à co-courant ou à courants croisés soient utilisées. Les garnissages sont des pièces formées régulièrement en métal, céramique, verre, graphite, ou matière plastique. Le nombre de types de garnissages inventés depuis une cinquantaine d'années est impressionnant. Le choix du type de garnissage dépend d'un grand nombre de facteurs dont les principaux sont :

- Le prix du matériau;
- La résistance à la corrosion : elle impose souvent le choix d'éléments en verre, en inox, en graphite, en céramique ou parfois en métaux précieux;
- La surface spécifique : une grande surface accélère les échanges. Les pertes de charge sont généralement élevées lorsque la surface spécifique est grande;
- Les dimensions des éléments jouent un rôle important. On choisira toujours des éléments de dimension uniforme pour éviter qu'ils ne s'emboîtent les uns dans les autres lorsqu'ils sont chargés en vrac.

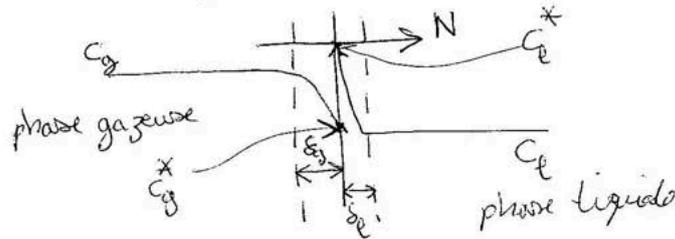


(a) Schéma d'une colonne à garnissage, (b) Garnissage structuré, (c) Garnissage en vrac, (d) Image d'un ruissellement de film liquide le long d'un garnissage

Dimensionnement d'une colonne d'absorption à garnissage

Dimensionnement d'une colonne d'absorption à garnissage :

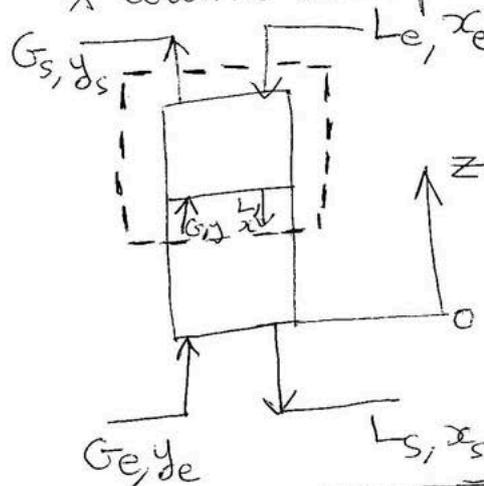
* Transport de matière entre la phase gaz et la phase liquide



$$N = k_G (c_g - c_g^*) = k_L (c_l^* - c_l) \quad [N] = \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$N = k_y (y - y^*) = K_x (x^* - x)$$

* Colonne d'absorption à garnissage



Bilan de matière en soluté :

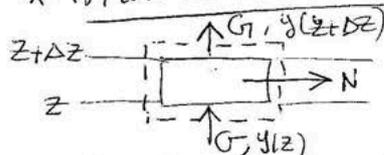
si $G_e = G_s = G$ et $L_e = L_s = L$

$$Gy + Lx_e = Gy_s + Lx$$

$$\Rightarrow y = \frac{L}{G} x - \frac{L}{G} x_e + y_s \quad (1)$$

ligne opératoire

* Bilan de matière côté gaz :



$$SGy(z) = SGy(z+\Delta z) + N\Delta z$$

$$y^* = mx \quad (2)$$

droite d'équilibre

$$G \frac{dy}{dz} = -Na \text{ avec } N = K_y (y - y^*)$$

$$[G] = [N] = [L] = \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

a est l'aire interfaciale spécifique
 K_y est coefficient de transfert de masse dans la phase gazeuse.

$$\textcircled{3} \quad H = \int_0^H dz = - \frac{G}{K_y a} \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{G}{K_y a} \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y - y^*}$$

HUT : hauteur d'une unité de transfert

NUT : Nombre d'une unité de transfert

L'équation (3) peut être résolue soit analytiquement ou numériquement.

* résolution analytique :

$$\text{HUT} = \frac{G}{K_y a} \quad \textcircled{4}$$

$$\text{NUT} = \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y - y^*} = \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y - mx} \quad \textcircled{5}$$

$$y^* = mx$$

Ligne opératoire (eq. (1))

$$y = \frac{L}{G} x - \frac{L}{G} x_e + y_s \Rightarrow x = \frac{G}{L} y + x_e - \frac{G}{L} y_s$$

On remplace x_e dans Eq. (5), on obtient :

$$NUT = \int_{y_s}^{y_e} \frac{dy}{y - m \left[\frac{G}{L} y + x_e - \frac{G}{L} y_s \right]}$$

$$A = \frac{L}{G} \quad (\text{facteur d'absorption})$$

$$NUT = \int_{y_s}^{y_e} \frac{A dy}{Ay - y - Ay_s^* + y_s} \quad \text{avec } y_s^* = m x_e$$

$$NUT = \frac{A}{A-1} \operatorname{Log} \left[\frac{(A-1)y_e + y_s - Ay_s^*}{A(y_s - y_s^*)} \right]$$

ou encore

$$NUT = \frac{A}{A-1} \operatorname{Log} \left[\frac{1}{A} + \frac{A-1}{A} \cdot \frac{y_e - y_s^*}{y_s - y_s^*} \right]$$

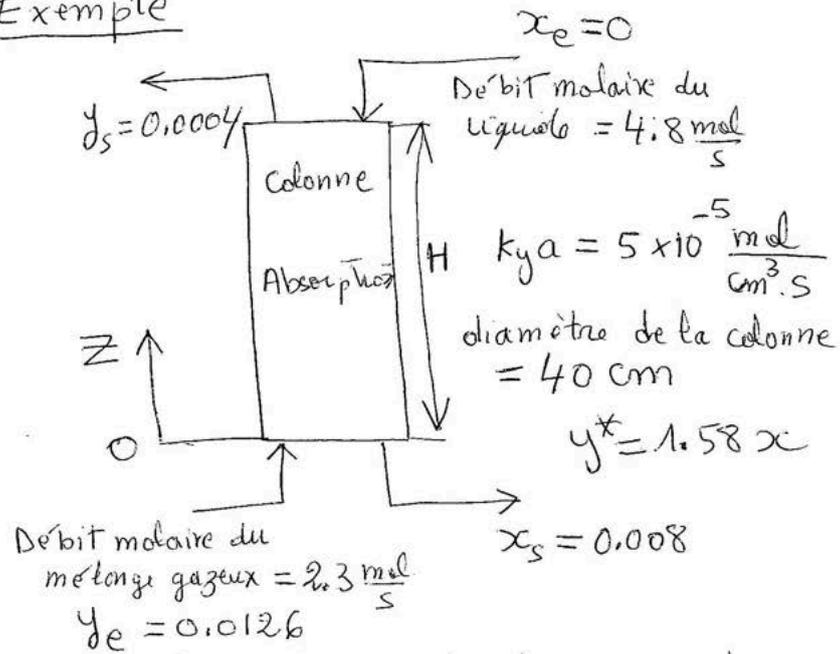
$$\text{si } \alpha = \frac{y_e - y_s}{y_e - y_s^*} = \frac{\text{quantité absorbée}}{\text{quantité maximale absorbée}}$$

$$NUT = \frac{A}{A-1} \cdot \operatorname{Log} \left[\frac{1 - (\alpha/A)}{1 - \alpha} \right] \quad (6)$$

$$HUT = \frac{G}{K_y a}$$

$$H = HUT \times NUT$$

(4)

Exemple

Calculer la hauteur de la colonne par la méthode analytique :

$$HUT = \frac{G}{k_y a} = \frac{1}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \frac{2.3}{5 \cdot 10^{-5}} = \boxed{36.6 \text{ cm}}$$

$$NUT = \frac{A}{A-1} \text{Log} \left(\frac{1 - \alpha/A}{1 - \alpha} \right)$$

$$A = \frac{L}{m} = \frac{4.8}{1.58} = \boxed{1.32} ; \alpha = \frac{y_e - y_s}{y_e - y_s^*} \Rightarrow$$

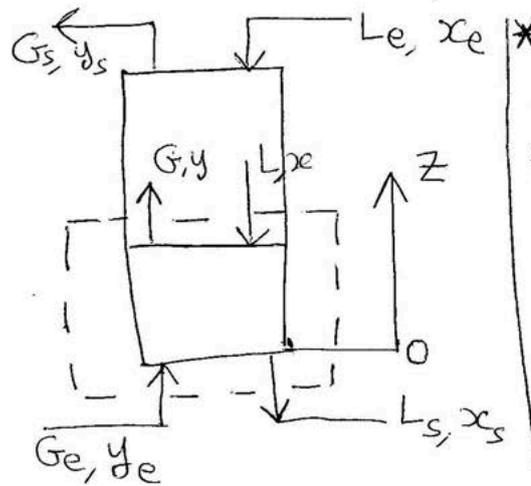
$$\alpha = \frac{0.0126 - 0.0004}{0.0126 - 0} = \boxed{0.968}$$

$$\boxed{NUT = 8.69} \quad \text{et } H = 8.69 \times 36.6 = \boxed{318 \text{ cm}}$$

Dimensionnement d'une colonne de désorption à garnissage

Dimensionnement d'une colonne de désorption à garnissage (5)

* Colonne de désorption à garnissage



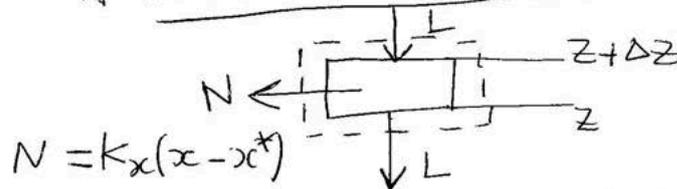
* Bilan de matière en solide :

$$G y_e + L x_e = G y + L x_s$$

$$\Rightarrow y = \frac{L}{G} (x - x_s) + y_e$$

ligne opératoire

* Bilan de matière côté liquide :



$$N = k_x (x - x^*)$$

$$S L x(z + \Delta z) = S L x(z) + N a S \Delta z \Rightarrow$$

$$\frac{L}{k_x a} \int_{x_s}^{x_e} \frac{dx}{x - x^*} = \int_0^H dz = H$$

$$HUT = \frac{L}{k_x a}$$

$$x_s^* = \frac{y_e}{m}$$

$$NUT = \frac{S}{S-1} \log \left[\frac{1}{S} + \frac{S-1}{S} \cdot \frac{x_e - x_s^*}{x_s - x_s^*} \right]$$

avec $S = \frac{1}{A}$ (facteur de désorption)

(6)

si $\sigma = \frac{x_e - x_s}{x_e - x_s^*}$ [fraction de description]

$$NUT = \frac{S}{S-1} \text{Log} \left[\frac{1 - (\sigma/S)}{1 - \sigma} \right] \quad (8)$$

Exemple :

calcul de la hauteur de la colonne de description numériquement :

$$H = HUT \times NUT$$

$$HUT = \frac{L}{K_x a}$$

$$NUT = \int_{x_s}^{x_e} \frac{dx}{x - x^*}$$

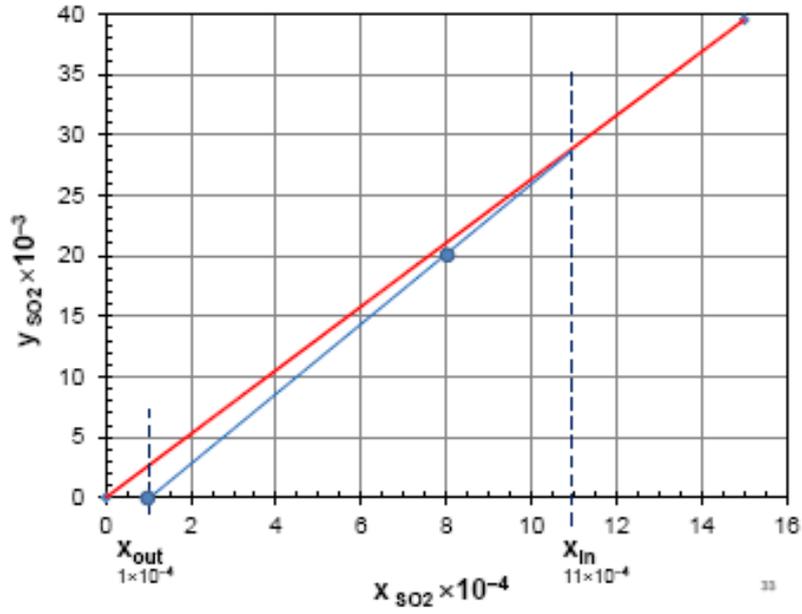
Nous voulons éliminer SO_2 de l'eau en utilisant l'air à $20^\circ C$. L'air entrant est pur. La sortie de l'eau contient 0.0001 [fraction molaire SO_2] et l'eau qui entre la colonne de description contient 0.0011 [fraction molaire de SO_2].
 $P_T = 855 \text{ mmHg}$ et $\frac{L}{G} = 0.9 \times \left(\frac{L}{G}\right)_{\max}$
 supposons : $HUT = 0.84 \text{ m}$ et \dots
 la droite d'équilibre est $y = 26.3 x$
 calculer H ?

Solution

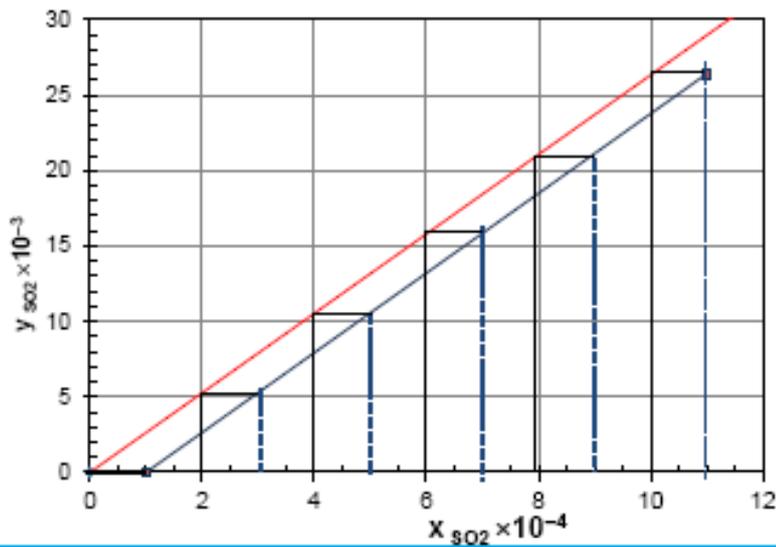
$$x_e = 0.0011$$

$$x_s = 0.0001$$

$$y_e = 0$$



$$(L/G)_{\max} = \frac{26.3 \times 0.0011 - 0}{0.0011 - 0.0001} = 29$$



X	X*	1/(X-X*)
1.0E-4	0	10,000
3.0E-04	2.0E-04	10,000
5.0E-04	4.0E-04	10,000
7.0E-04	6.0E-04	10,000
9.0E-04	8.0E-04	10,000
1.1E-03	1.0E-03	10,000

La règle de Simpson à 7 points est définie comme suit :

$$\int_{X_0}^{X_6} f(X) dX = \frac{h}{3} [f(X_0) + 4f(X_1) + 2f(X_2) + 4f(X_3) + 2f(X_4) + 4f(X_5) + f(X_6)]$$

$$h = \frac{(X_6 - X_0)}{6}$$

$$\int_{X_0}^{X_6} f(X) dX = \frac{(X_6 - X_0)}{6 \times 3} [f(X_0) + 4f(X_1) + 2f(X_2) + 4f(X_3) + 2f(X_4) + 4f(X_5) + f(X_6)]$$

H = 8 m

La règle de Simpson à 5 points est définie comme suit :

$$\int_{X_0}^{X_4} f(X) dX = \frac{h}{3} [f(X_0) + 4f(X_1) + 2f(X_2) + 4f(X_3) + f(X_4)]$$

Avec

$$h = \frac{(X_4 - X_0)}{4}$$

	X	X*	f(x) = 1/(X-X*)
0	1.0E-4	0	10,000
1	3.5 x 10 ⁻⁴	2.5 x 10 ⁻⁴	10,000
2	6 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴	10,000
3	8.5 x 10 ⁻⁴	7.5 x 10 ⁻⁴	10,000
4	1.1E-4	10.8 x 10 ⁻⁴	10,000

La règle de Simpson à 3 points est définie comme suit :

$$\int_{X_0}^{X_2} f(X) dX = \frac{h}{3} [f(X_0) + 4f(X_1) + f(X_2)]$$

$$h = \frac{(X_2 - X_0)}{2}$$