

CHAPITRE 1 : Absorption–Stripping (Désorption)

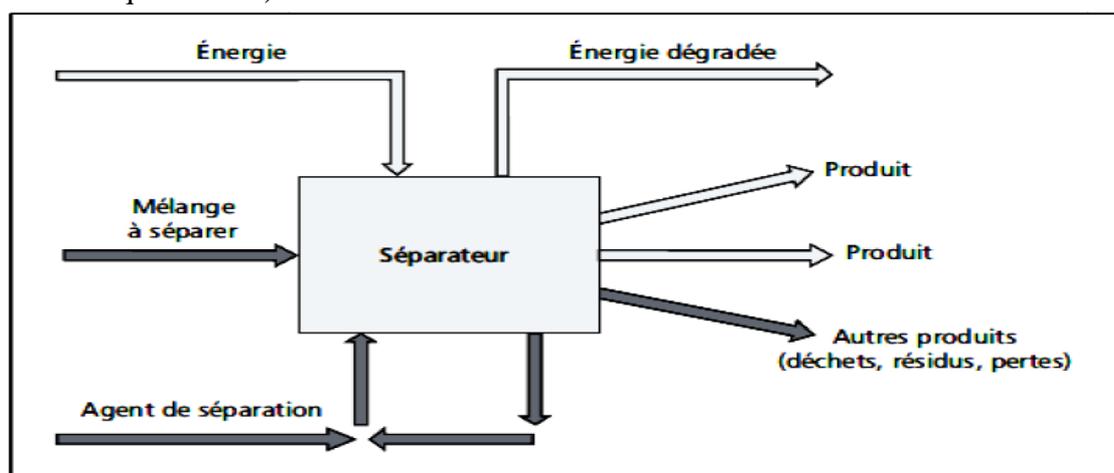
1. Aperçu sur les opérations unitaires

Une opération unitaire est un élément de la chaîne de production d'un composé. En effet, l'élaboration de tout produit industriel se fait selon une suite coordonnée d'opérations individuelles qui vont, pour la chimie, de la préparation et la purification des matières premières jusqu'au conditionnement des produits finis.



Parmi les opérations unitaires les plus répandues dans le domaine industriel et qui sont basées sur le phénomène de transfert (matière et chaleur), on cite les opérations de séparation par diffusion qui sont mises en oeuvre avec un équilibre entre deux phases : liquide-vapeur (distillation), liquide-liquide (extraction), liquide solide (cristallisation, adsorption, extraction), liquide-gaz (absorption), solide-gaz (séchage, adsorption).

L'objectif de cette séparation peut être la purification du composé d'intérêt (élimination d'impuretés), la concentration d'une solution (élimination d'un solvant), ou le fractionnement d'un mélange avec enrichissement d'un composé (molécules en quantités équivalentes).



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

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

Par exemple : la distillation est une grande consommatrice d'énergie et l'augmentation du coût de l'énergie depuis 1973 a amené les industriels à envisager d'autres méthodes de séparation (extraction liquide-liquide, cristallisation, absorption, diffusion à travers des membranes) de façon plus systématique que par le passé, comme substituts à la distillation.

La démarche générale, adoptée pour toutes les opérations unitaires consiste de :

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

2. Généralités sur l'absorption et la désorption

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.

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.

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.

3. Principe de l'absorption :

Absorption	Désorption
dissoudre un soluté contenu dans un mélange gazeux, à l'aide d'un solvant liquide dans lequel le soluté est soluble	opération inverse de l'absorption, c'est à dire élimination d'un soluté dissous dans un liquide, à l'aide d'un gaz non soluble dans ce liquide ;
opération exothermique (dégagement de chaleur)	opération généralement endothermique (absorption de chaleur)
favorisée par une pression élevée et une faible température	favorisée par une faible pression et une température élevée.

4. Types d'absorption :

a) Absorption physique :

Si le composé à transférer ne subit aucune modification, le processus est une simple absorption, c'est l'absorption physique basée sur la solubilité du composé dans la phase liquide.

b) Absorption chimique :

Dans un certain nombre de cas le processus d'absorption est accompagné d'une réaction chimique en phase liquide, on parle ici de l'absorption chimique (le gaz entre en réaction avec le liquide absorbant et donne une substance plus ou moins stable (lavage des gaz ; H₂O, SO₂, CO₂).

5. Conditions de réalisation de l'absorption :

a) La température :

La solubilité augmente que la température diminue. Il y aura donc tout intérêt à travailler à une température aussi basse que possible. Il faut, de plus, tenir compte du fait que l'absorption est un phénomène exothermique et que la chaleur produite devra être dissipée.

b) La surface du contact :

En augmentant la surface de contact entre le gaz et le liquide ; on augmente les possibilités d'échange entre les deux phases.

c) Le temps du contact :

Le temps du contact doit être suffisant pour permettre le transfert des solutés de la phase gaz vers la phase liquide.

d) Choix du solvant :

- Ne doit pas être visqueux ;
- Ne doit pas être produire de mousse ;
- Doit être peu volatil pour minimiser son entrainement par le gaz ;
- Doit avoir une grande capacité d'absorption ;
- Doit être facile à séparer du produit à absorber ;
- De manière générale, le solvant doit être thermiquement stable, peu cher, non toxique et non inflammable.

6. Termes utilisés :

Absorbeur : colonne d'absorption (contacteur gaz-liquide, laveur) ;

Désorbeur : colonne de désorption (dégazeur) ;

Absorbat : gaz que l'on doit récupérer de la phase gaz par dissolution dans le liquide par absorption (soluté) ;

Diluant : gaz peu soluble ou insoluble dans le liquide (inerte) ; gaz contenant le soluté en absorption

Gaz riche : alimentation gaz en absorption, sortie gaz en désorption (**diluant-soluté**).

Gaz pauvre : sortie en absorption, alimentation gaz en désorption ; Le gaz dépourvu plus ou moins complètement du soluté est appelé : gaz épuisé.

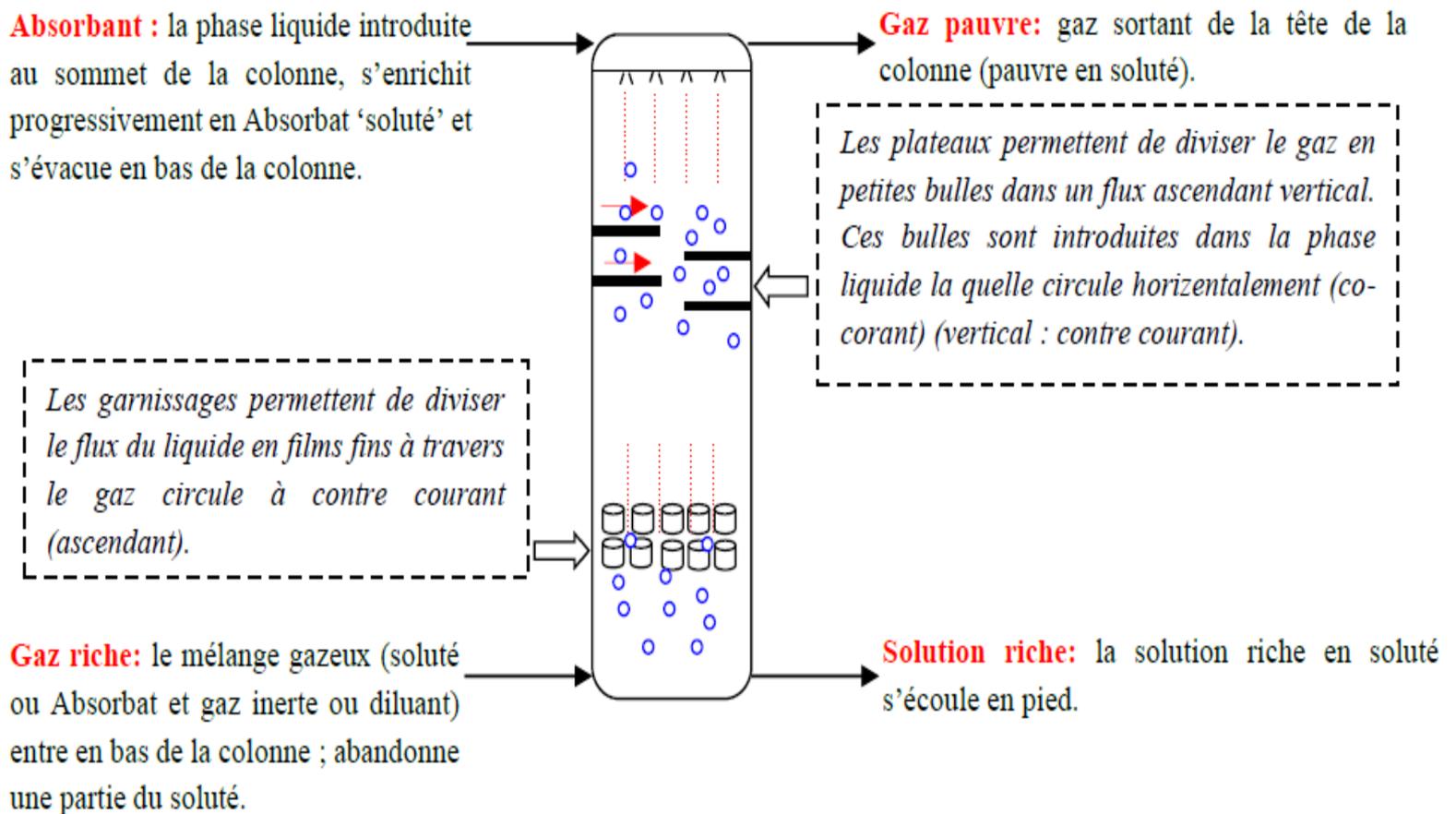
Solvant ou absorbant : alimentation liquide destinée à dissoudre le soluté en absorption ;

Solution riche : sortie liquide obtenu par dissolution du soluté dans le solvant

7. Mode opératoire et fonctionnement du procédé

a) Appareillages :

L'absorption nécessite une colonne de séparation dans laquelle le transfert de matière est favorisé par une importante surface du contact entre le liquide et le gaz. Les colonnes d'absorption sont généralement des colonnes à plateaux ou à garnissages.

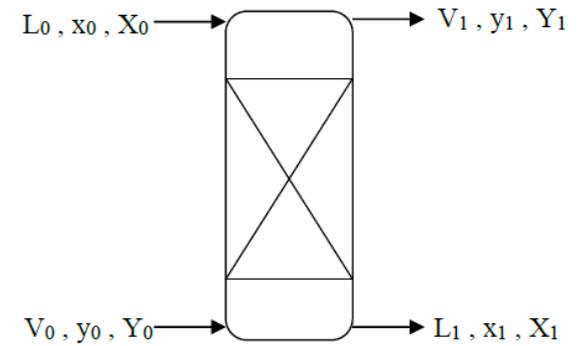


Représentation d'une colonne d'absorption

b) Notations :

Phase liquide :

- **L** : débit de la phase liquide ; indice '0' à l'entrée, '1' à la sortie ;
- **x** : titre massique en soluté dans la phase liquide ;
- **(1 - x)** : titre massique du solvant exempt du soluté ;
- **L'**: débit du solvant exempt du soluté : $(1 - x) = L' / L \rightarrow L' = L (1 - x)$;



Ce débit est constant tout le long de la colonne lorsque le gaz inerte est insoluble dans le liquide ;

- **X** : rapport massique en soluté dans la phase liquide, avec $X = x / (1 - x)$.

B. Phase gaz :

- **V** : débit de la phase gaz ; indice '0' à l'entrée, '1' à la sortie ;
- **y** : titre massique en soluté dans la phase gaz ;
- **(1 - y)** : titre massique du gaz inerte hors soluté ;
- **V'**: débit du gaz inerte hors soluté : $(1 - y) = V' / V \rightarrow V' = V (1 - y)$;
- Ce débit est constant tout le long de la colonne lorsque le gaz inerte est insoluble dans le liquide.
- **Y** : rapport massique en soluté dans la phase liquide, avec $Y = y / (1 - y)$.

Bilan matière :

B.M.G :

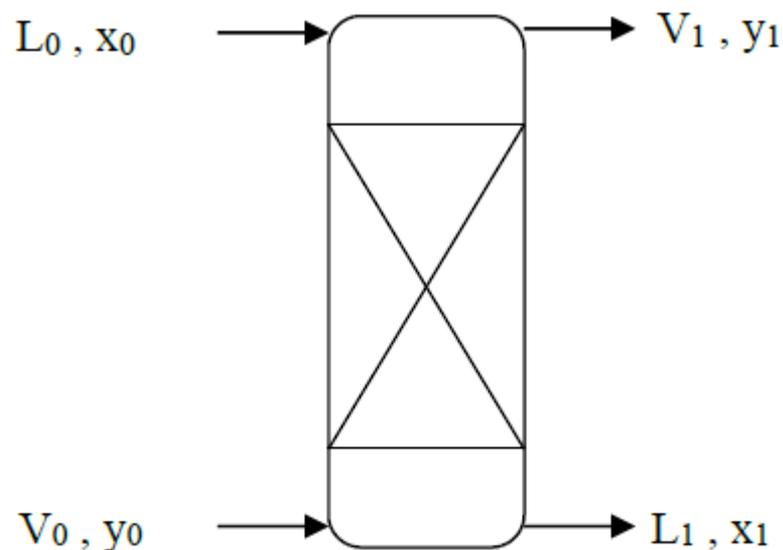
$$L_0 + V_0 = L_1 + V_1$$

B.M / soluté :

$$L_0 x_0 + V_0 y_0 = L_1 x_1 + V_1 y_1$$

B.M / solvant :

$$L_0 (1 - x_0) = L_1 (1 - x_1) = L'$$



8. Calcul de colonne d'absorption

Le calcul d'une colonne d'absorption se fonde spécialement sur les bilans et sur les lois d'équilibre entre phases et a pour but de déterminer le nombre d'étages théoriques nécessaires pour la réalisation d'une séparation donnée.

a) Equilibre gaz-liquide :

Un système est dit en équilibre lorsque trois conditions simultanées sont vérifiées :

- L'équilibre thermique : la température est la même dans tous les points ;
- L'équilibre mécanique : la pression est la même dans tous les points ;
- L'équilibre chimique : la vitesse des constituants est la même.

L'étude théorique de ces équilibres est relativement complexe. Néanmoins, il est possible de trouver des relations simples, à température constante.

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:

$$y_B = \frac{P_B}{P_{totale}} \quad (\text{Loi de Dalton})$$

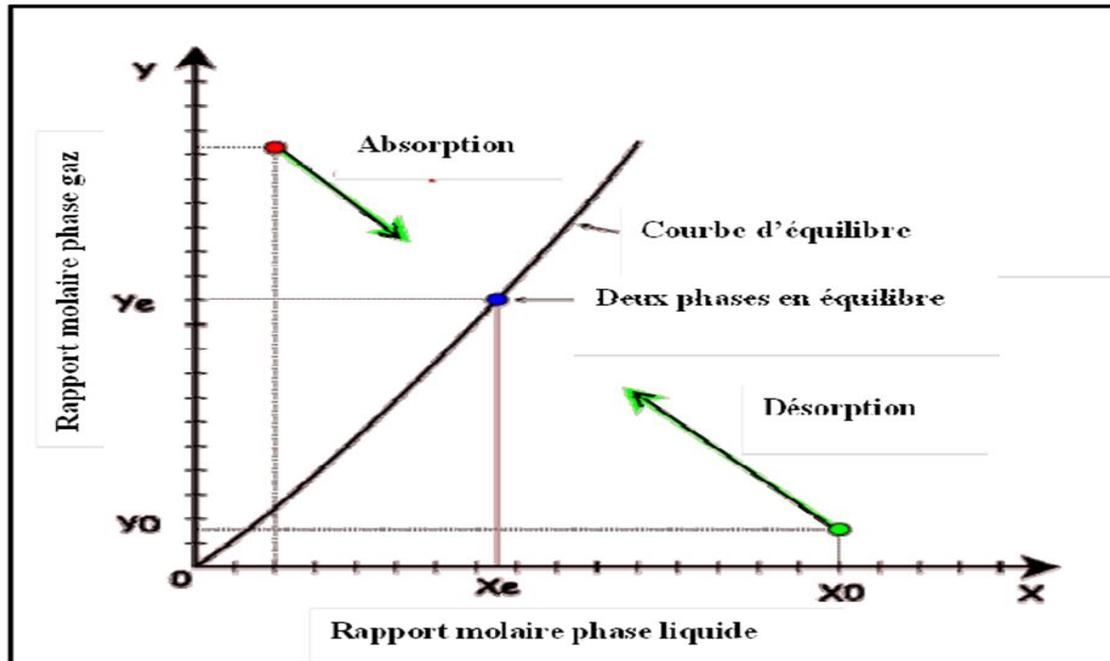
On obtient l'équation suivante :

$$y_B = \frac{H_B}{P_{totale}} x_B$$

Equation de la courbe de distribution ou d'équilibre est une droite de la pente H_B/P_{totale} est égale au coefficient de distribution ou d'équilibre K du soluté B à l'interface gaz- liquide.

Représentation des équilibres

Soient : Y rapport molaire en soluté phase gaz, X rapport molaire en soluté phase liquide. Le tracé de Y en fonction de X donne la courbe d'équilibre ou de partage. (Cette représentation peut également être tracée en titre massique ou en titre molaire)



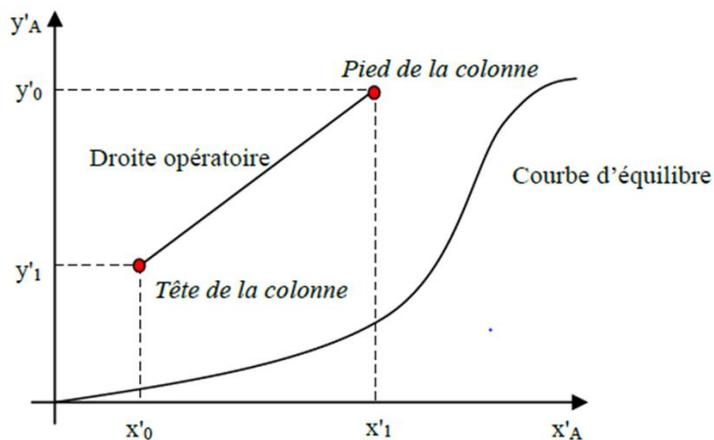
Courbe de partage ou d'équilibre en rapport molaire (Solvant et inerte insolubles) - Absorption et désorption

- Si la phase gaz est plus riche en soluté que la phase liquide par rapport à l'équilibre, il y a absorption du soluté par le liquide (X augmente, Y diminue).
- Si la phase liquide est plus riche en soluté que la phase gaz par rapport à l'équilibre, il y a désorption du soluté vers la phase gaz.

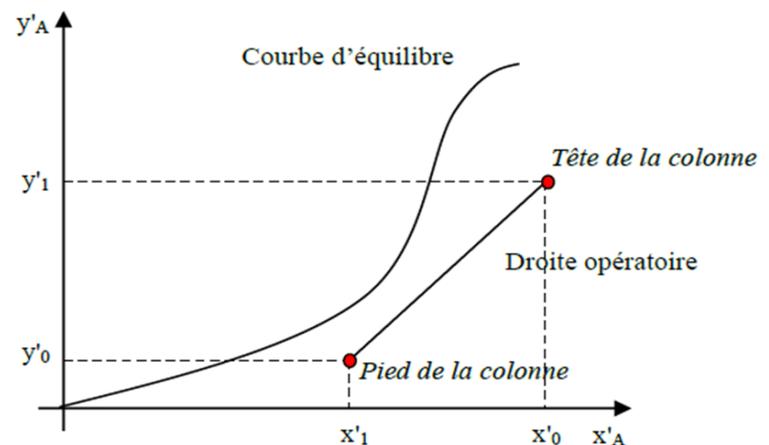
b) Courbe d'équilibre et la droite opératoire

La détermination de la courbe opératoire repose sur les résultats du bilan matière sur la colonne.

- La droite opératoire est située au-dessus de la courbe d'équilibre dans le cas d'absorption.
- La droite opératoire est située au-dessous de la courbe d'équilibre dans le cas de désorption.



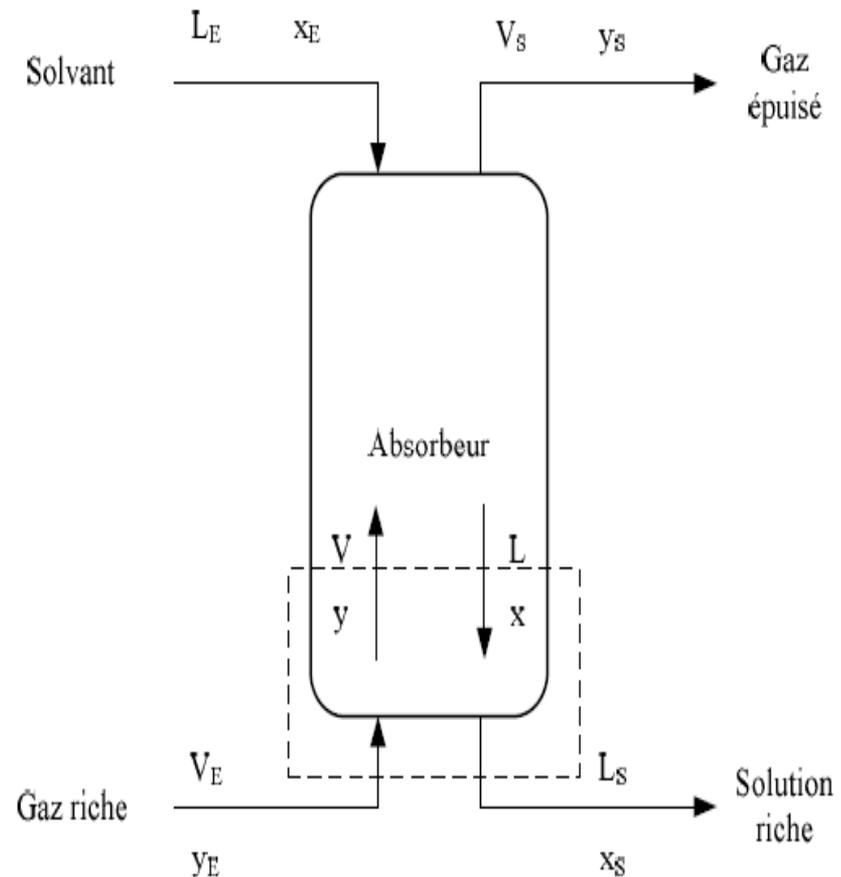
Droite opératoire ; cas d'absorption



Droite opératoire ; cas de désorption

c) Détermination des plateaux théoriques

On considérera pour cette étude que le diluant ou inerte est insoluble dans le solvant et qu'il n'y a pas de solvant entraîné dans la phase gazeuse.



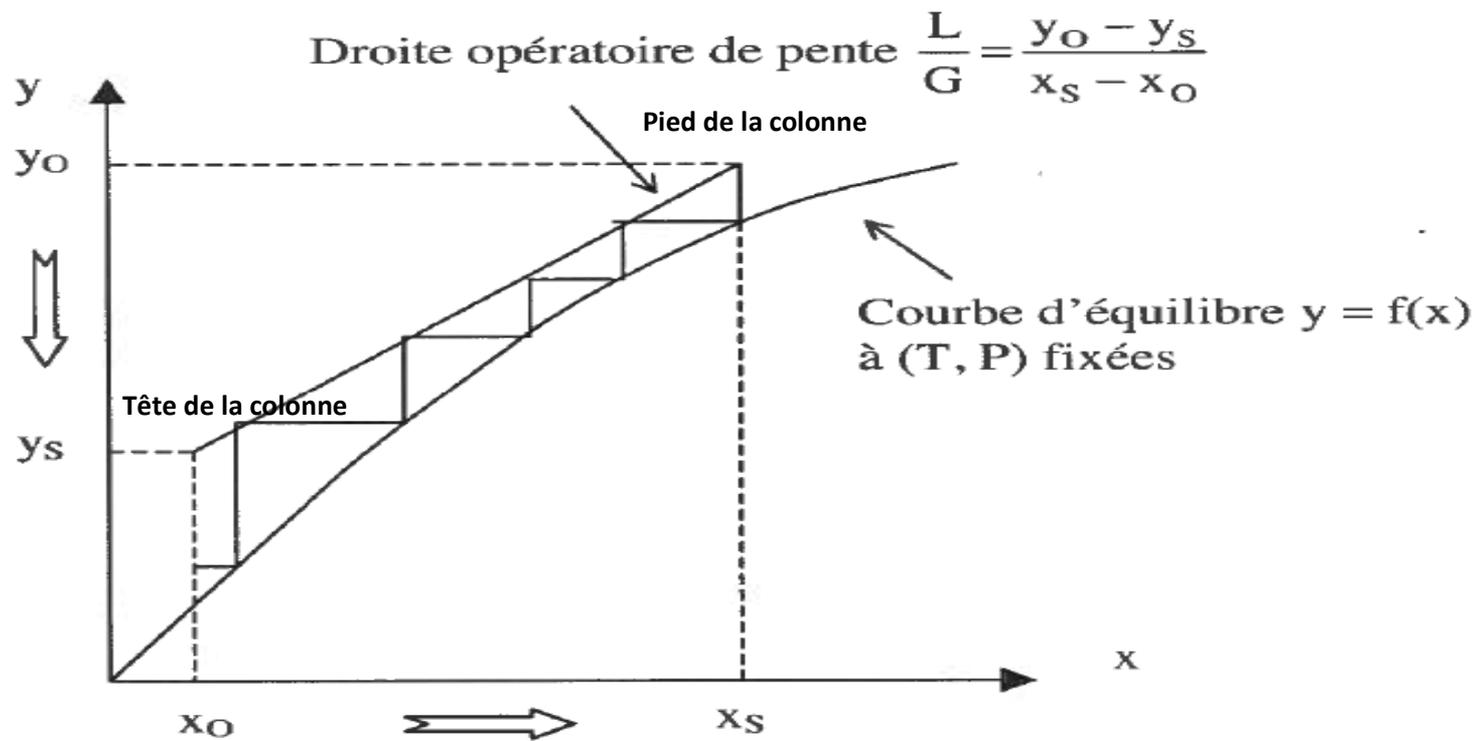
Bilan matière aux frontières : $V_E + L = V + L_S$

Bilan partiel en soluté : $V_E y_E + Lx = Vy + L_S x_S$

Équation de la droite opératoire : $y = \frac{L}{V}x + \frac{V_E}{V}y_E - \frac{L_S}{V}x_S$

Le tracé de cette droite opératoire sur la courbe d'équilibre permet de déterminer le Nombre d'Etage Théorique NET de la colonne.

La méthode graphique part du diagramme d'équilibre sur lequel on trace la courbe d'équilibre et la droite opératoire (**méthode de Mac Cab et Thiel**).



Les points situés sur la courbe d'équilibre représentent l'équilibre des phases gaz-liquide sur les plateaux, alors que les points appartenant à la droite d'opération représentent l'état du système gaz-liquide entre deux positions d'équilibre (plateaux).

Cette méthode consiste à tracer des segments de droite (marches d'escaliers) entre la courbe d'équilibre, la droite d'opération et les points indiquant les titres désirés ; c'est le nombre de points touchants la courbe d'équilibre qui donne le nombre minimum de plateaux théoriques.

Méthodologie de détermination du taux de solvant minimum :

✚ Faibles concentrations :

Dans le cas des faibles concentrations, nous pouvons faire l'hypothèse que les débits de gaz et de liquides sont constants tout au long de la colonne d'absorption. Ainsi $V_E = V_S = V$ et $L_E = L_S = L$

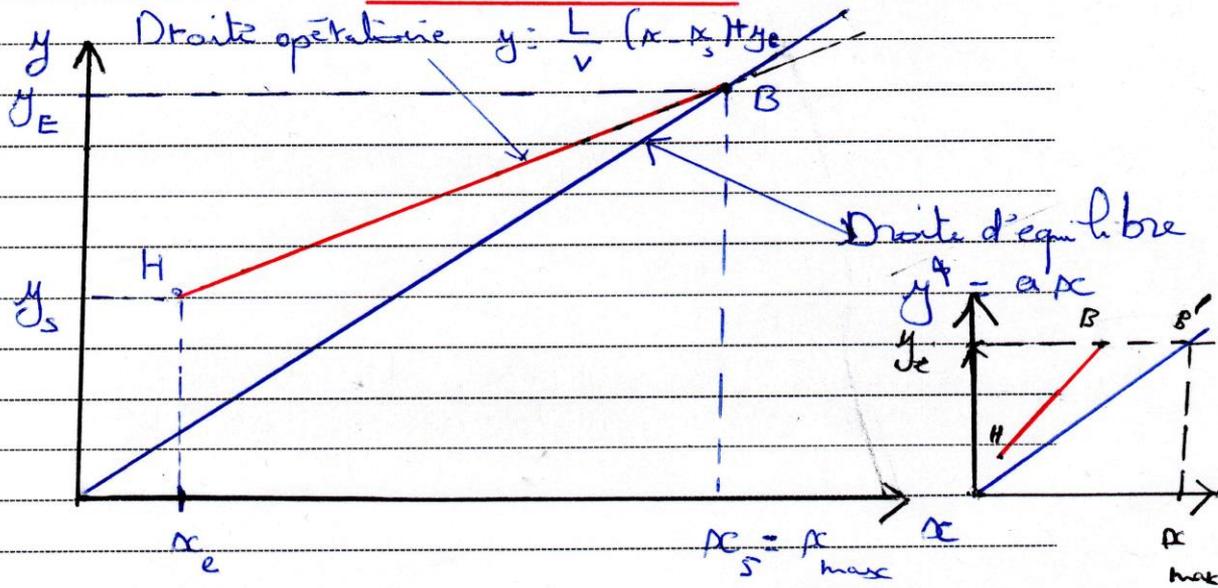
La droite opératoire devient donc : $y = \frac{L}{V}(x - x_s) + y_E$

✚ Forte concentration :

Dans le cas des 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 $V_E \neq V_S$ et $L_E \neq L_S$

Méthodologie de détermination du taux de solvant minimum

faibles concentrations



$B(x_s, y_E)$ Bas de la colonne
 $H(x_E, y_s)$ Haut de la colonne. } Absorption

- Chaque titre molaire en phase liquide x correspond à deux titres molaires en phase gazeuse dont:
 y^* qui sera en équilibre avec la phase liquide de composition x (les courbes L et V quittent le même point)
 y qui vérifie l'équation de la droite opératoire (les courbes L et V se croisent).

- Lorsque $y = y^*$, on dit que le transfert du soluté cesse, la pente de la droite opératoire est alors minimale et coupe la droite d'équilibre

- La projection du point d'intersection sur l'axe des abscisses donne le titre molaire maximal du soluté dans la phase liquide: $(x_{s,max})$.

À partir de l'équation de la droite opératoire

$$y_s = \frac{L}{V} \left(\alpha_E - \alpha_{\max} \right) + y_e$$

d'où $\frac{L}{V} \Big|_{\min} = \frac{y_s - y_e}{\alpha_E - \alpha_{\max}}$ (taux de solvant minimum)

$\frac{L}{V} \Big|_{\text{opt}} = K \frac{L}{V} \Big|_{\min}$ (taux de solvant optimal)

Forcé concentration $V_E \neq V_S$ et $L_E \neq L_S$

Equation de la droite opératoire $y = \frac{L}{V} \alpha + \frac{V_E}{V} y_E - \frac{L_S}{V} \alpha_S$
 α le débit de solvant par L' et le débit de diluant V' restent constant tout au long de la colonne.

$$L'_E - L'_S (1 - \alpha_E) = L'_S (1 - \alpha_S) \Rightarrow L'_S = \frac{L'_E - L'_S}{1 - \alpha_S - 1 + \alpha_E} \quad (2)$$

$$V'_E (1 - y_E) = V'_S (1 - y_S) \Rightarrow V'_E = \frac{V'_S (1 - y_S)}{1 - y_E} \quad (3)$$

On remplace (2) et (3) dans (1) [Pour faire le changement de coordonnées]

$$y = \frac{1 - \alpha}{V'} \alpha + \frac{1 - y_E}{V'} y_E - \frac{1 - \alpha_S}{V'} \alpha_S$$

$$y = \frac{L'_E}{V'} \frac{1 - y}{1 - \alpha} \alpha + \frac{1 - y}{V'} y_E - \frac{L'_E}{V'} \frac{1 - y}{1 - \alpha_S} \alpha_S$$

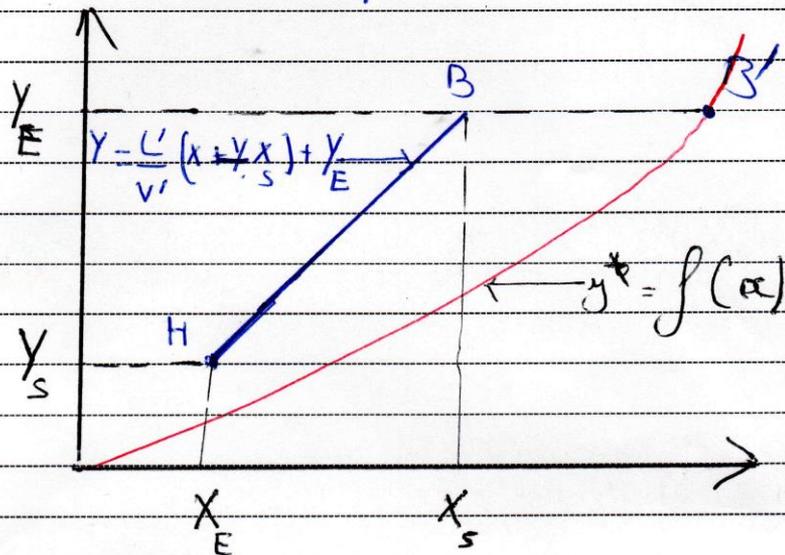
$$y = 1 - y \left[\frac{L'_E}{V'} \frac{\alpha}{1 - \alpha} + \frac{y_E}{1 - y_E} - \frac{L'_E}{V'} \frac{\alpha_S}{1 - \alpha_S} \right]$$

X
 Y_E
 X_S

$$Y = \frac{L'}{V'} X + Y_E - \frac{L'}{V'} X_S$$

$$\Rightarrow Y = \frac{L'}{V'} (X - X_S) + Y_E$$

Ce qui est bien une équation d'une droite mais dans un repère (X, Y) et non (α, y) .



À partir du rapport molaire d'alimentation gazeuse, tracer l'horizontale et noter le point B' intersection entre cette horizontale et la droite d'équilibre. Lire l'abscisse X_m du point B'

$$Y_S = \frac{L'}{V'} \Big|_{\min} (X_E - X_{\max}) + Y_E$$

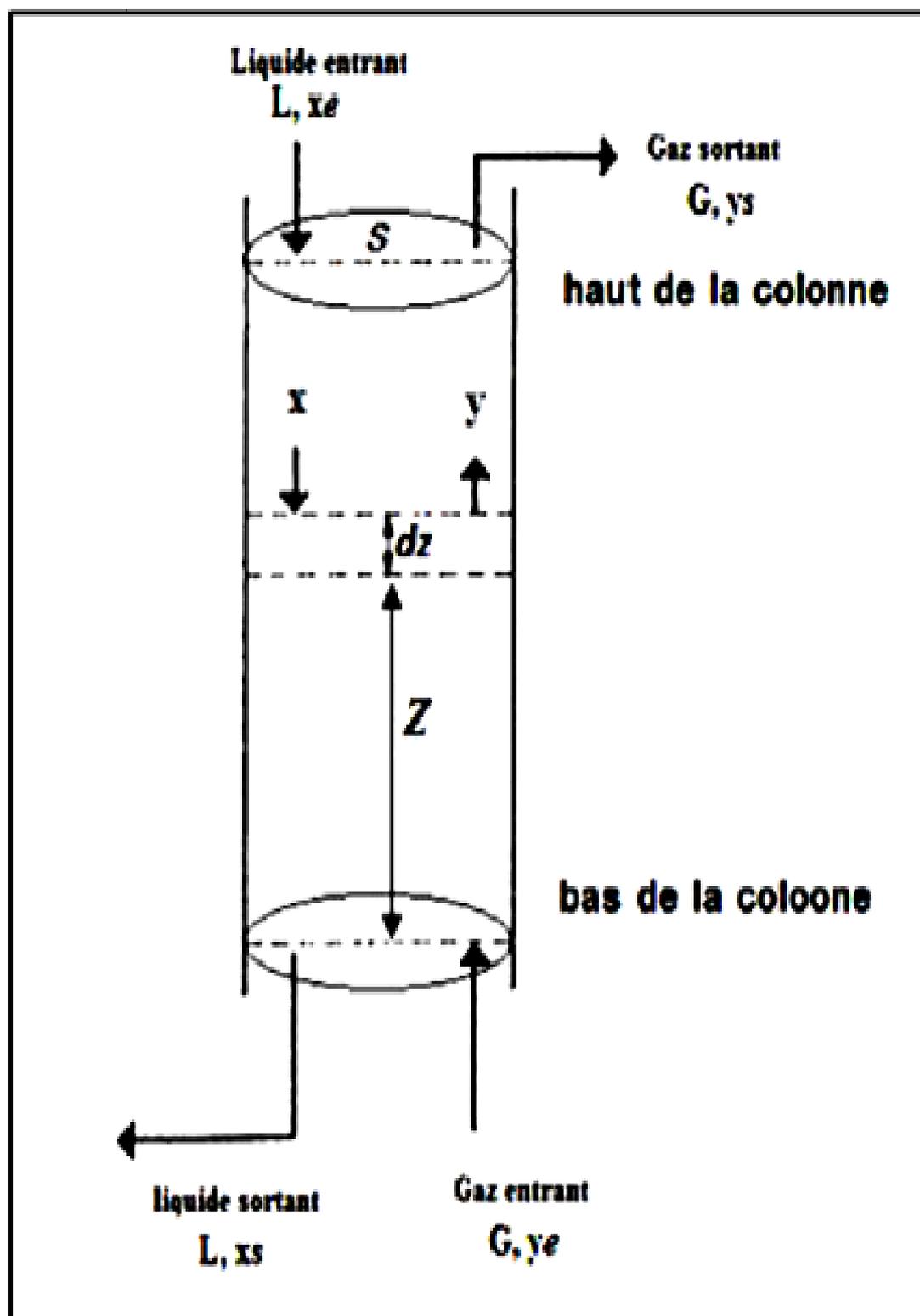
$$\frac{L'}{V'} \Big|_{\min} = \frac{Y_S - Y_E}{X_E - X_{\max}}$$

$$\frac{L'}{V'} \Big|_{\text{opt}} = K \frac{L'}{V'} \Big|_{\min}$$

d) Notion d'unité de transfert

$$L_0 = L_s = Cte = L$$

$$G_0 = G_s = Cte = G$$



d / Notion d'unités de transfert.

Entre le bas de la colonne et une section quelconque à la cote z , l'équation du bilan sur le soluté :

$$G y_e + L x = G y + L x_s \quad (1)$$

$$\Rightarrow G (y_e - y) = L (x_s - x) \Rightarrow \frac{L}{G} = \frac{x_s - x}{y_e - y} \quad (2)$$

Le bilan en soluté sur un élément de colonne d'épaisseur dz peut s'obtenir en dérivant l'équation (1).

$$\text{On dérive l'équation (1)} : L dx = G dy = dN \quad (3)$$

Avec dN : Flux de soluté transféré d'une phase à l'autre dans la tranche de volume $S dz$. (S : Aire de la section droite de la colonne)

$$\text{On a: } dN = K_g (A S dz) (y - y_i) \quad (4) \text{ Pour la phase gazeuse}$$

$$dN = K_L (A S dz) (x_i - x) \quad (5) \text{ Pour la phase liquide}$$

A : Surface d'échange entre les phases.

K : Coefficient de transfert.

$x_i - x$ et $y - y_i$: forces motrices dans chacune des 2 phases.

Le produit $K (A S dz)$ représente la conductance de transfert dans chaque phase.

x_i, y_i : la composition à l'interface (valeurs inconnues)

$$\text{donc } dN = K_g (A S dz) (y - y^*) \quad (6)$$

$$dN = K_L (A S dz) (x^* - x) \quad (7)$$

x^* : titre d'une phase liquide qui serait en équilibre avec la phase gazeuse de composition y .

y^* : titre d'une phase gazeuse qui serait en équilibre avec la phase liquide de composition x .

$y - y^*$ et $x^* - x$ sont les écarts par rapport à l'équilibre

On remplace (6) et (7) dans (3).

$$L dx = K_L (A.S. dz) (x^* - x) \Rightarrow dz = \frac{L}{K_L A.S.} \frac{dx}{x^* - x}$$

$$G dy = K_y (A.S. dz) (y - y^*) \Rightarrow dz = \frac{G}{K_y A.S.} \frac{dy}{y - y^*}$$

donc $\frac{L}{A.S. K_L} \frac{dx}{x^* - x} = \frac{G}{A.S. K_y} \frac{dy}{y - y^*} = dz$ (8)

$$Z = \frac{L}{A.S. K_L} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x^* - x} = \frac{G}{A.S. K_y} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y - y^*}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{HUT}_L} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{NUT}_L} \qquad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{HUT}_G} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{NUT}_G}$

HUT: hauteur d'unité de transfert.

NUT: nombre d'unités de transfert.

$$\text{HUT}_L = \frac{L}{A.S. K_L} \quad / \quad \text{HUT}_G = \frac{G}{A.S. K_y}$$

$$\text{NUT}_L = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x^* - x} \quad / \quad \text{NUT}_G = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y - y^*}$$

Alors, la hauteur totale de la colonne.

$Z =$ hauteur d'unité de transfert \times nombre d'unités de transfert

$$Z = \text{HUT}_L \times \text{NUT}_L = \text{HUT}_G \times \text{NUT}_G$$