

CHAPITRE II :

Analyse des procédés.

Notions de bases

II.1 Fonctions de base des unités usuelles dans les procédés

Un procédé de transformation est un ensemble d'opérations unitaires se déroulant chacune dans un appareil spécifique. Les appareils le plus souvent rencontrés sont décrits brièvement ci-dessous.

II.1.1 Diviseur (splitter)

Un diviseur est un appareil qui permet de diviser un courant de matière en deux courants ou plus avec des débits différents. Le schéma représentatif d'un diviseur est donné figure(II.1). Les 3 courants F_1 , F_2 et F_3 ont la même composition car aucune opération n'a lieu entre l'entrée et la sortie.

On ne peut écrire qu'une seule équation indépendante de bilan de matière (composition identique des 3 courants).

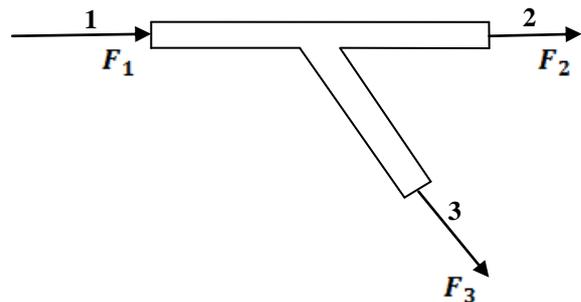


Figure II.1 : schéma d'un diviseur

II.1.2 mélangeur (mixer/blendeur)

Deux courants de matière ou plus arrivent dans l'appareil pour être mélangés et un seul courant en sort (courant mélange). Les courants peuvent être en phase gazeuse, liquide ou solide (figure II.2).

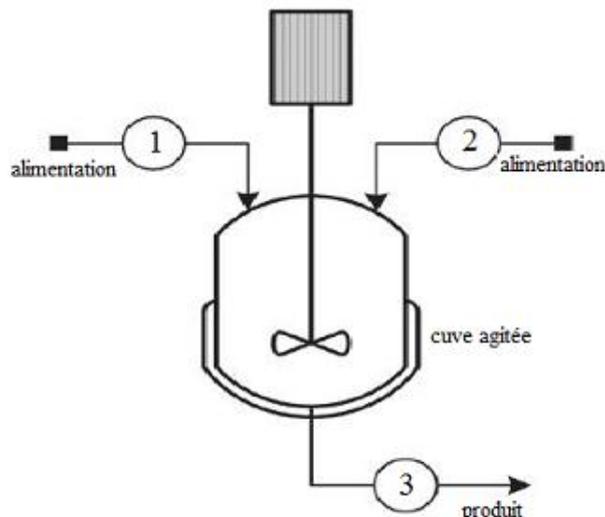


Figure II.2 : mélangeur (cuve agitée)

II.1.3 Sécheur (dryer)

Le séchage est une opération de transfert de matière dans laquelle de l'humidité est éliminée par évaporation, d'une phase solide ou d'une phase liquide pour obtenir un produit sec. Cette opération nécessite un apport de chaleur. En plus du produit sec, on récupère à la sortie un courant de vapeur pure. L'alimentation peut être un solide, une suspension ou une solution. Le produit séché peut contenir une humidité résiduelle (figure II.3).

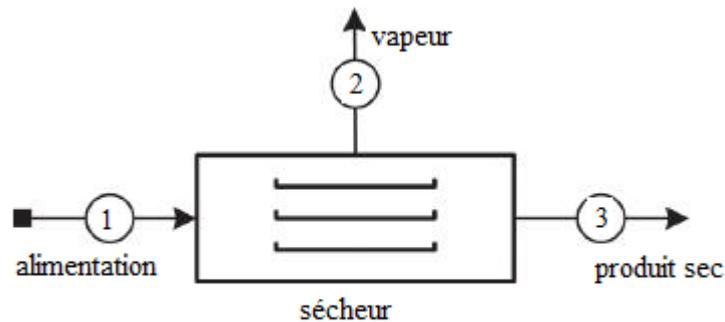


Figure I.3 : Sécheur

II.1.4 filtre (filter)

La filtration est une opération qui permet la séparation d'une phase solide (sous forme de particules) présente dans une phase fluide (suspension) à l'aide d'un milieu filtrant qui laisse passer la phase fluide que l'on appelle filtrat, et retient le solide formant ainsi ce que l'on appelle un gâteau de filtration (figure II.4). Le produit recherché peut être le filtrat ou le gâteau de filtration.

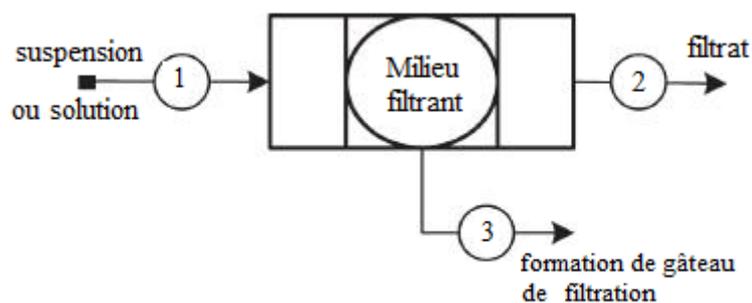


Figure I.4 : Filtre

II.1.5 Colonne de distillation

La distillation est une technique de séparation basée sur les différences de volatilité entre les constituants d'un mélange liquide. Elle est souvent utilisée dans les procédés de transforma-

tion. Dans une colonne de distillation, les constituants les plus volatils sont récupérés dans le distillat au sommet de la colonne, et les moins volatils au fond de la colonne dans le rebouilleur. Les plateaux sont disposés dans la colonne pour un meilleur contact entre la vapeur qui monte en s'enrichissant en constituant le plus volatil, et le liquide qui descend en s'enrichissant du moins volatil (figure II.5).

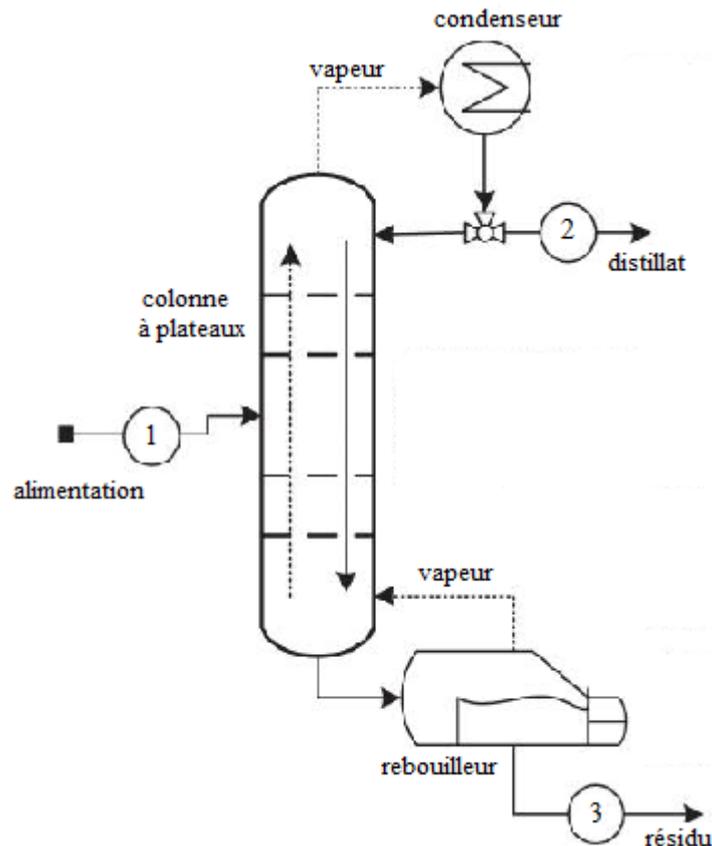


Figure II.5 : colonne de distillation

II.1.6 Evaporateur multiple effet

Un évaporateur permet de concentrer des solutions (généralement aqueuses). C'est un procédé présent dans de nombreux domaines tels que les industries chimique ou agroalimentaire. Elle consiste à retirer par ébullition de l'eau à la solution. Elle est également utilisée en dessalement. Sur la figure II.6, est montré un évaporateur triple effets.

Une solution de concentration initiale C_0 est introduite dans l'évaporateur. L'énergie cédée par la vapeur de chauffe (qui se condense) via un échangeur thermique dans le premier évaporateur permet de vaporiser une partie de l'eau contenue dans la solution et ainsi de concentrer cette dernière. La solution concentrée C_1 est ensuite dirigée vers le second évaporateur, alors que les vapeurs issues de la première vaporisation sont récupérées et assurent le chauffage du second évaporateur (toujours en se condensant). Le chauffage du troisième évaporateur suit le même principe et permet ainsi de concentrer une troisième fois la solution en utilisant la vapeur issue du second évaporateur. Il s'agit d'un triple effet à co-courant. On peut citer deux autres types ; l'évaporateur triple effets à contre-courant et à alimentations parallèles.

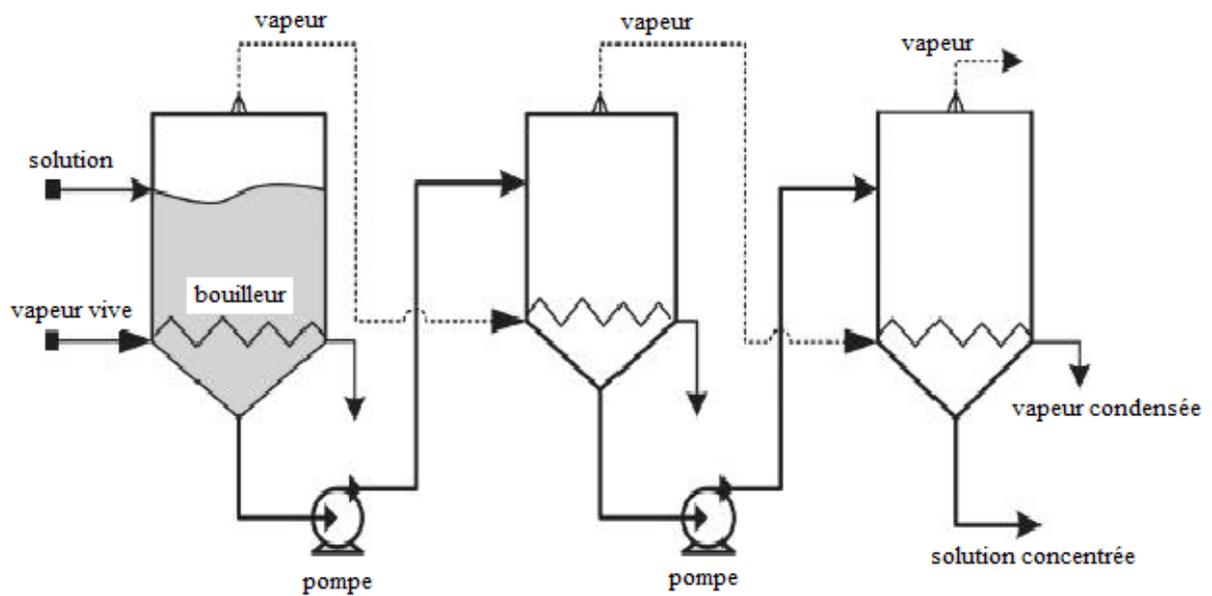


Figure II.6: évaporateur triple effets à co-courant

II.1.7 Déshumidificateur

C'est un appareil qui permet de réduire le taux d'humidité de l'air ou d'un gaz. Le courant d'alimentation (air humide par exemple) en traversant l'appareil est mis en contact avec un échangeur pour le refroidir en dessous de sa température de rosée ; la vapeur est condensée. On obtient à la sortie un courant d'air sec et un condensat qui est l'eau liquide (figure II.7).

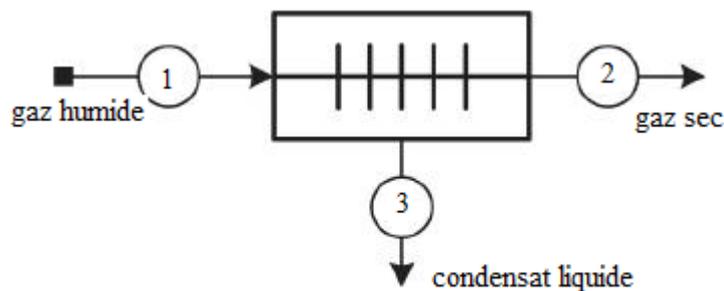


Figure II.7 : déshumidificateur

II.1.8 Humidificateur

C'est un appareil qui permet d'humidifier un courant d'air ou un air d'intérieur. De l'eau est pulvérisée en très fines gouttelettes dans le courant d'air à l'intérieur de l'appareil. Ces gouttelettes passent à l'état vapeur en augmentant ainsi l'humidité de l'air. Le courant d'air sec ou de très faible humidité et le courant d'eau liquide à pulvériser constituent les deux courants d'alimentation de l'appareil. Le courant d'air humidifié constitue le courant de sortie (figure II.8).

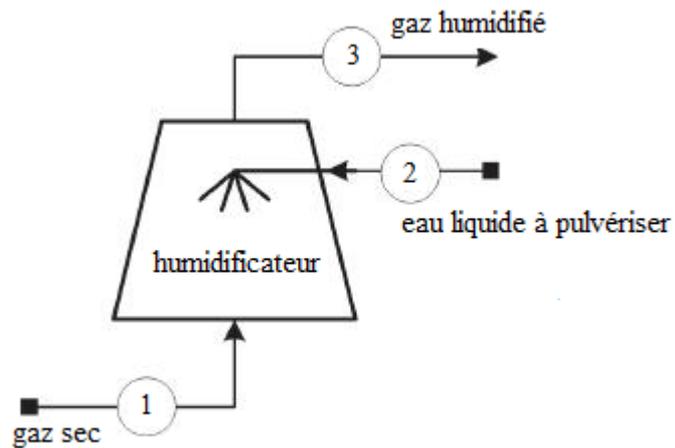


Figure II.8 : humidificateur

II.1.9 Extracteur

L'extraction liquide-liquide est une opération qui permet la séparation d'un ou plusieurs constituants par l'utilisation de leur distribution inégale dans deux liquides pratiquement non-miscibles. Généralement on met en contact intime la **solution d'alimentation**, contenant les constituants à séparer (**solutés**) avec un autre solvant appelé **solvant** qui extrait préférentiellement un ou plusieurs des solutés. Le solvant qui contient alors le ou les solutés est désigné sous le terme d'**extrait**, la solution d'alimentation ayant perdu la majeure partie de ces mêmes constituants est appelé **raffinat** (figure II.9). si le (ou les) soluté(s) est (sont) extrait (s) d'une phase solide alors on parle d'extraction solide-liquide.

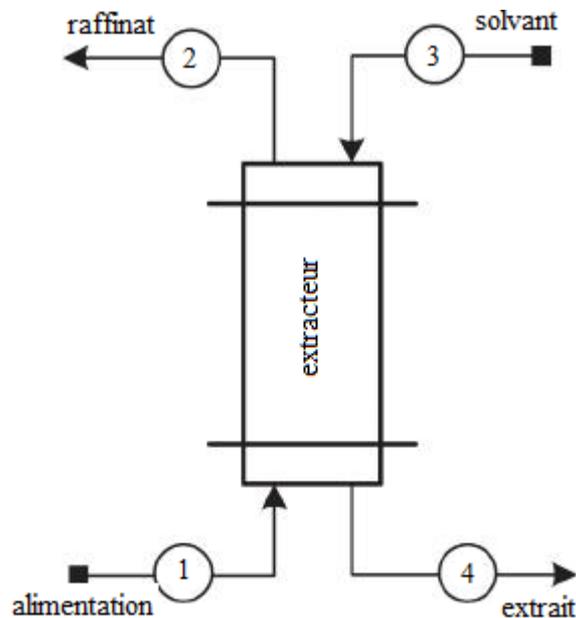


Figure II.9 : extracteur liquide-liquide

II.1.10 Colonne d'absorption

L'absorption est une opération de transfert de matière d'un composé présent dans une phase gazeuse vers une phase liquide par dissolution. L'opération inverse de transfert d'un gaz dissous par un gaz inerte est appelé désorption. Ces procédés sont effectués dans une colonne entre un effluent gazeux ascendant et une solution ou un solvant descendant (figure II.10).

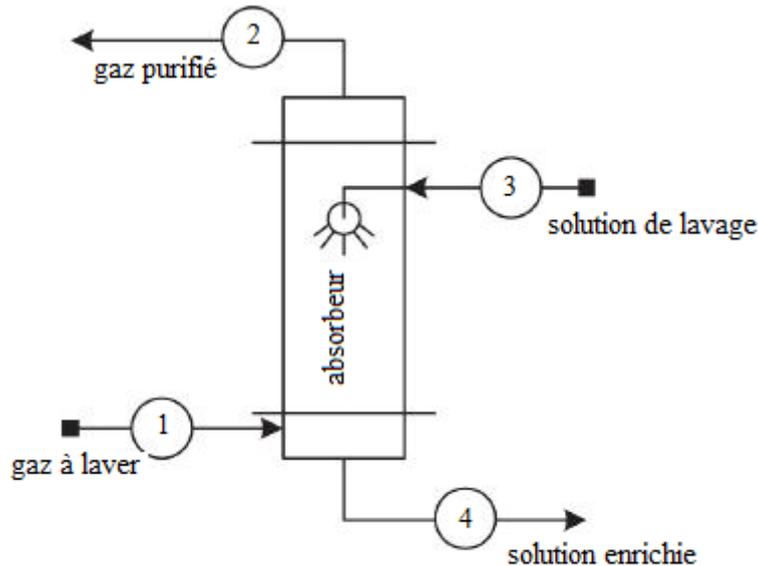


Figure II.10 : colonne d'absorption à contre-courant

II.1.11 Condenseur partiel et séparateur flash

C'est un échangeur de chaleur qui permet de condenser partiellement une vapeur. L'alimentation est une vapeur de plusieurs constituants condensables. Le courant de sortie est un mélange liquide- vapeur en équilibre (figure II.11).

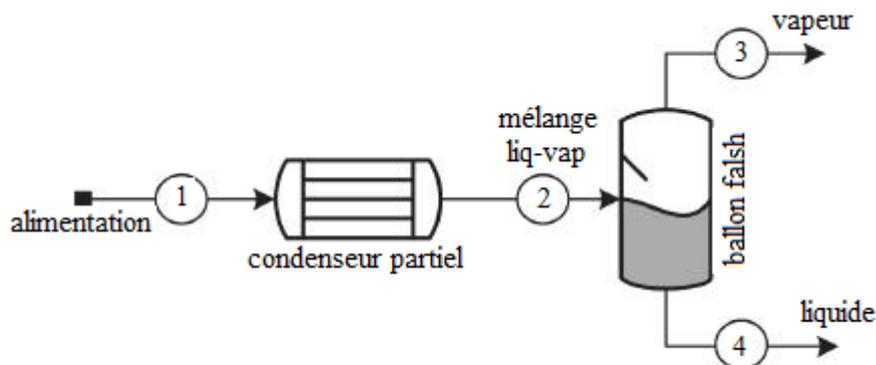


Figure II.11 : condenseur partiel + séparateur flash

II.1.12 ballon flash ou séparateur flash

C'est un appareil qui permet de séparer une alimentation liquide en une phase vapeur qui sort en haut, et une phase liquide en bas. La séparation est réalisée en réduisant la pression à l'intérieur du ballon, ou bien en chauffant l'alimentation (figure II.12). Les deux phases sont en équilibre.

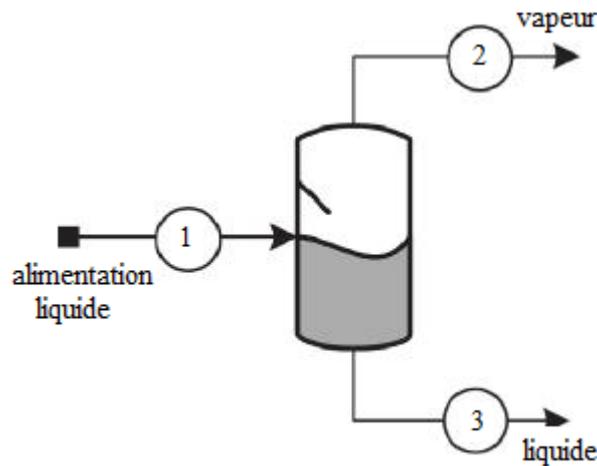


Figure II.12 : ballon séparateur

II.1.13 Cristalliseur

Les cristalliseurs sont utilisés dans les procédés pour réaliser une séparation solide-liquide. Le solide présent dans la solution d'alimentation sous forme dissoute, se cristallise à l'intérieur de l'appareil grâce à un changement de température. Les cristaux sont séparés du liquide par l'intermédiaire d'un filtre. L'opération de cristallisation permet d'obtenir des produits de très haute pureté avec une faible consommation d'énergie (figure II.13).

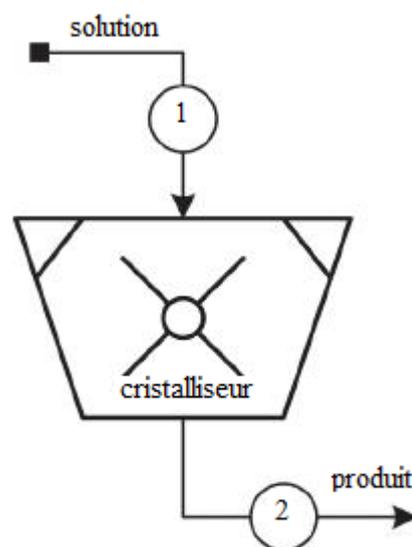


Figure II.13 : cristalliseur

II.1.14 Réacteurs

Les appareils dans lesquels sont conduites les réactions chimiques sont appelés réacteurs chimiques. Les réactifs constituent le courant d'alimentation. A la sortie, le courant est un mélange des produits formés et des réactifs qui n'ont pas réagi. Sur la figure II.14, on montre un réacteur avec un courant de recyclage mélangé au courant d'alimentation au niveau d'un nœud de mélange. Le courant de sortie peut être constitué de plusieurs phases.

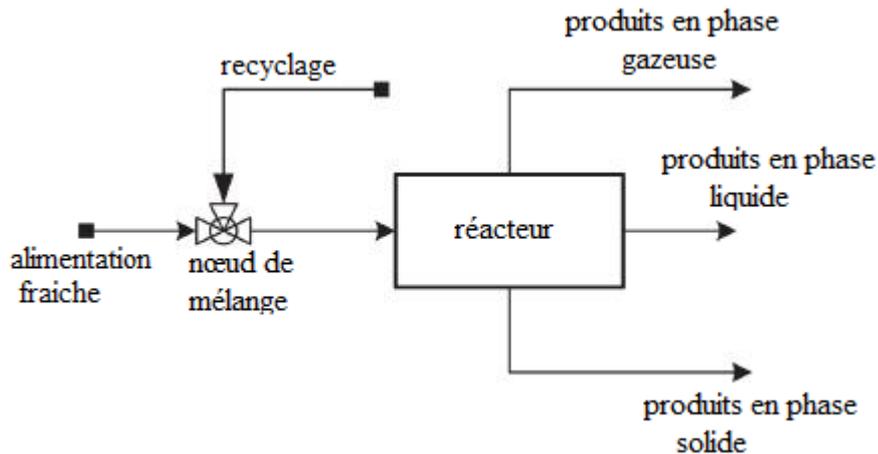
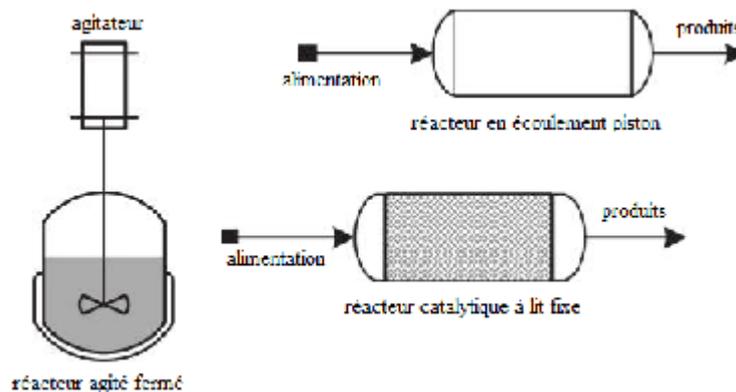
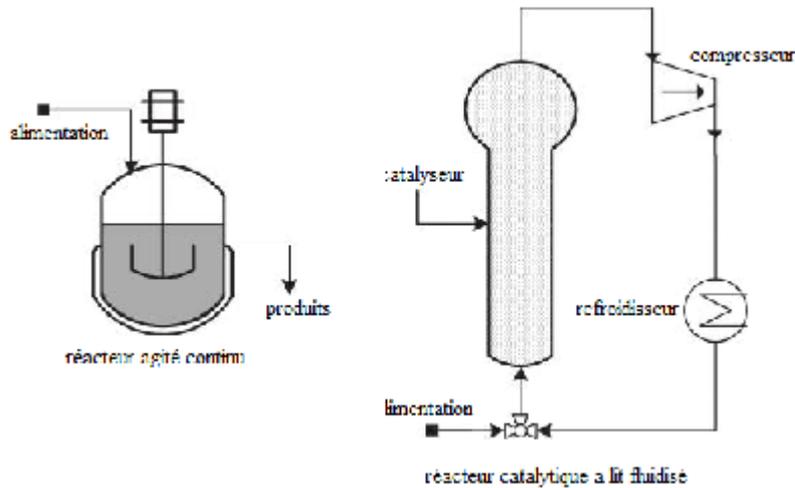


Figure II.14 : réacteur chimique

Différents types de réacteurs sont utilisés dans l'industrie des procédés : le réacteur fermé (batch reactor), le réacteur en écoulement piston (plug flow reactor - PFR), le réacteur catalytique à lit fixe (packed bed reactor - PBR), le réacteur agité continu (continuous stirred tank reactor - CSTR), le réacteur catalytique à lit fluidisé (fluidized bed reactor).





II.2 Analyse d'un procédé

II.2.1 Diagramme (schéma) de circulation d'un procédé – PFD

La première démarche à réaliser, avant d'entreprendre l'analyse d'un procédé, consiste à schématiser l'ensemble des opérations mises en jeu, en représentant l'agencement des différents appareils sièges de ces opérations, ainsi que tous les courants de matières traversant le procédé. Il s'agit du diagramme de circulation du procédé (process flow diagram/flow sheet).

On note ensuite sur le schéma toutes les données comme par exemple celles provenant des essais en laboratoire (compositions, taux de conversion, rapports de débits...) ainsi que les flux connus ou les capacités de production.

On dénombre enfin toutes les inconnues pour lesquelles on doit écrire un nombre équivalent d'équations indépendantes, linéaires ou non linéaires dont la résolution conduira à la solution du problème.

Exemple : PFD d'une colonne de distillation (figure II.15)

Un mélange benzène-toluène de composition **50%** en masse en benzène est destiné à être séparé dans une colonne de distillation pour obtenir un distillat de composition **90%** en benzène, et un résidu de composition **95%** en toluène. On veut traiter **100 kg** de mélange par heure. Proposer un schéma de circulation du procédé et spécifier les différents courants.

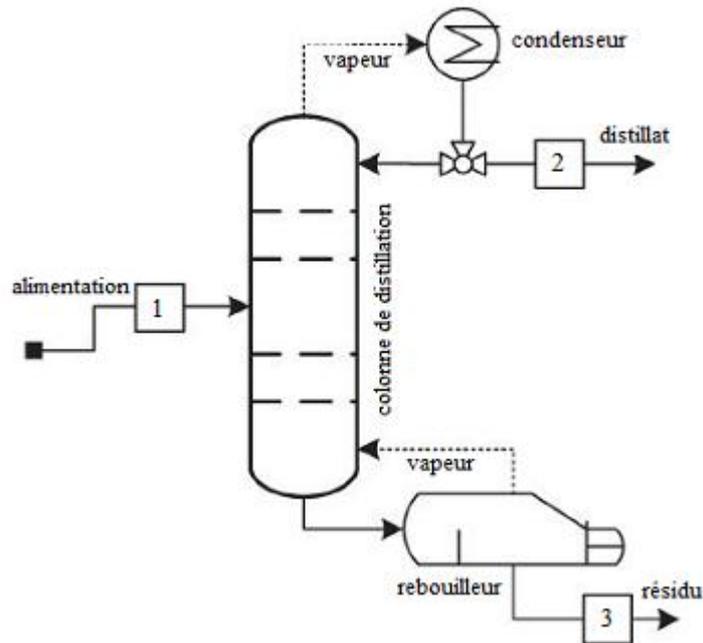


Figure II.15 : PFD d'une colonne de distillation

Le type et l'architecture des procédés que le spécialiste est amené à étudier peuvent varier très largement. Chaque cas nécessite, donc, une analyse spécifique, fonction de ses caractéristiques.

On peut, cependant, dégager un certain nombre de règles générales qui guideront à la résolution de chaque cas particulier.

II.2.2 Analyse global du procédé

Dans ce cas, le système considéré est le procédé dans son ensemble. Si le procédé comporte n entrées et m sorties, le problème met déjà en jeu $n + m$ débits massiques (ou molaires). Si le procédé utilise p espèces chimiques différentes, éventuellement présentes dans les n -entrées et les m -sorties, le problème consiste à déterminer les $(n + m)p$ débits partiels correspondants.

- Dans le cas où il n'y a pas de réaction chimique, les équations de conservation de chacune des espèces (bilan massique ou molaire) fournissent plusieurs relations indépendantes. Le problème est d'autant plus ouvert que le nombre d'entrées et de sorties est élevé et il est impératif, donc, de trouver :

$$[(n + m)p - p] \text{ relations supplémentaires}$$

\swarrow
 nombre d'inconnues

\searrow
 nombre d'équations de bilan de matière indépendantes

- Si le procédé étudié comporte un ou plusieurs réacteurs, on ne peut écrire la conservation des réactifs qui sont transformés par chacune des réactions. On peut cependant écrire le bi-

CHAPITRE II : Analyse des procédés. Notions de bases

lan de masse global qui ne fournit qu'une seule équation, généralement utilisée pour valider les résultats.

Dans ce cas, on peut écrire les équations qui traduisent la conservation des éléments chimiques présents, dans tous les produits (on entend par élément chimique, tous les atomes tels que H, C, O, N, etc.). Si l'ensemble des constituants (réactifs, produits, impuretés, solvants...) met en jeu q éléments chimiques, le nombre d'équations indépendantes est égal à $q - 1$. Le nombre de relations supplémentaires devient maintenant : $[(n + m)p - (q - 1)]$

Chercher ces relations supplémentaires constitue, à chaque fois, un problème particulier. On peut, cependant, indiquer que :

- la composition de certains courants peut être connue (par exemple, on sait qu'une matière première est pure) ou bien doit être imposée (par exemple, tel produit n'est commercialisable que s'il satisfait certaines spécifications) ;
- certaines performances globales doivent être connues. Par exemple, on doit pouvoir évaluer, d'une manière ou d'une autre, les consommations de certaines espèces et les productions d'autres par les réactions chimiques mises en jeu. On doit, également, pouvoir fixer les taux de partage de certaines espèces que les dispositifs de séparation et de purification vont permettre d'atteindre.

Par exemple, dans une première analyse grossière, on pourra supposer que les rendements et sélectivités chimiques mesurés au laboratoire vont être atteints à l'échelle industrielle. Pour les séparations, on fera souvent l'hypothèse qu'elles sont tranchées, c'est-à-dire que chaque produit se retrouve dans un seul courant précis et parfois à l'état pur. Il est utile de préciser, ici, que tant que le spécialiste ne dispose pas du nombre de relations nécessaire, résoudre le bilan matière global s'avère tout simplement impossible. La seule solution consiste à poursuivre le raisonnement pour établir les relations manquantes. Ce travail peut imposer d'effectuer des mesures, en particulier sur les efficacités des transformations chimiques (taux de conversion, sélectivité,...)

Au niveau des bilans énergétiques, le problème comporte $(n + m)$ températures inconnues et un flux global d'échange avec le milieu extérieur, soit $(n + m + 1)$ inconnues. Au départ, le spécialiste dispose d'une seule équation, celle de bilan enthalpique global. Il doit, donc, trouver $(n + m)$ équations supplémentaires pour fermer le problème. Très souvent, il connaîtra ou fixera arbitrairement les températures de chaque courant et calculera le flux global d'échange.

II.2.3 Analyse appareil par appareil

Si l'analyse globale d'un procédé fournit déjà des informations utiles, par exemple sur les flux de matières premières, les flux de produits, le flux global d'énergie thermique à échanger avec l'extérieur, elle est loin de donner toutes les informations nécessaires. Le design de chacun des appareils qui constituent le procédé ne devient possible, en effet, que lorsque les débits entrant et sortant, les températures et les compositions des courants correspondants sont connus. Le nombre d'inconnus devient beaucoup plus élevé que précédemment puisqu'il faut déterminer,

CHAPITRE II : Analyse des procédés. Notions de bases

outre les débits, températures et compositions des entrées et sorties dans le procédé et le flux global échangé avec l'extérieur, toutes les caractéristiques des courants entre appareils et les flux de chaleur échangés avec l'extérieur appareil par appareil. Heureusement, le nombre d'équations croît aussi puisqu'on peut ajouter aux bilans matière et enthalpie globaux, ces mêmes bilans appareils par appareils. Il n'en reste pas moins vrai que, si on se limitait à ces relations, le problème resterait ouvert. Il faut donc ajouter un grand nombre d'équations supplémentaires correspondant, soit au comportement chimique et physique global de l'unité, soit maintenant à ces mêmes comportements mais appareil par appareil.

Comme nous l'avons fait dans le paragraphe précédent, nous voulons préciser que les bilans ne deviennent solubles qu'à partir du moment où on a réuni suffisamment d'informations sur les performances de chaque appareil pour fermer le problème. Ajoutons que la précision des calculs de bilan s'améliore au fur et à mesure qu'on affine les caractéristiques du fonctionnement de chaque appareil.

II.2.4 analyse des degrés de liberté de procédés – DFA

Pour manipuler toutes ces équations (citées ci-dessus), on introduit la notion de nombre de degrés de liberté que l'on définit, dans le cas le plus général, par :

$$\begin{aligned} NDF = & \text{le nombre de variables inconnues} \\ & + \text{le nombre de réactions chimiques indépendantes} \\ & - \text{le nombre d'équations de bilan de matière indépendantes} \\ & - \text{le nombre de relations supplémentaires utiles} \end{aligned}$$

La première étape, avant de calculer ce nombre, est de tracer les frontières qui identifient les différents systèmes pour lesquels on écrit les équations de bilan. On doit d'abord commencer par tracer les frontières autour de chaque unité, ensuite autour des nœuds et enfin autour de l'ensemble du procédé. La seconde étape est de vérifier quel est le nombre d'équations de bilan que l'on peut écrire pour chaque système tracé ; en sachant qu'on peut écrire autant d'équations que de composants traversant le système.

Selon la valeur du NDF, Trois situations peuvent se présenter :

- 1- $NDF = 0$, le problème admet une solution unique (on parle de système complètement spécifié) ;
- 2- $NDF > 0$, le problème admet une infinité de solutions (on parle de système sous-spécifié) ;
- 3- $NDF < 0$, le problème n'admet pas de solutions (on parle de système sur-spécifié).

II.2.4.1 système d'équations indépendantes

On parle de système d'équations indépendantes lorsqu'on ne peut pas obtenir l'une quelconque des équations par combinaison linéaires des autres (par addition ou soustraction par exemple).

Exemple de système d'équations indépendantes :

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 + 2\dot{m}_2 + \dot{m}_3 &= 100 \\ 2\dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 &= 200 \end{aligned}$$

CHAPITRE II : Analyse des procédés. Notions de bases

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + 2\dot{m}_3 = 500$$

Aucunes des trois équations ne peut être obtenue en combinant les autres.

Exemple de système d'équations dépendantes : $\dot{n}_1 + 2\dot{n}_2 + \dot{n}_3 = 100$ (1)

$$2\dot{n}_1 + 4\dot{n}_3 = 100$$
 (2)

$$4\dot{n}_1 + 8\dot{n}_3 = 200$$
 (3)

Les équations (2) et (3) ne sont pas indépendantes. En multipliant par un facteur 2 la deuxième équation, on obtient la troisième.

Analyse d'un procédé de séparation par distillation

Exemple 1:

La composition du mélange binaire à séparer est $x_{AF} = 50\%$, $x_{BF} = 50\%$

Le débit d'alimentation est $F = 300 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$

Les spécifications du courant distillat sont : $D = 200 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$, $x_{AD} = 60\%$

- Etablir le schéma de circulation (PFD) et faire l'analyse du nombre de degrés de liberté (DFA).

Le PFD est donné sur la figure (II.16).

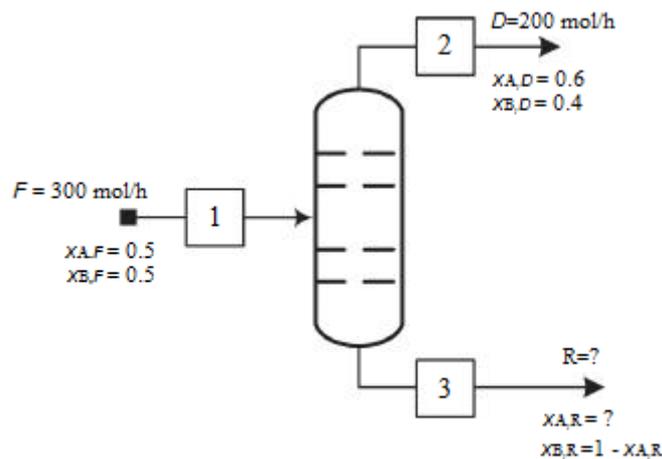


Figure II.16 : PFD d'un procédé de distillation binaire

Tableau II.1 : DFA

| DFA | N° | justification |
|------------------------------------|----|-----------------------------------|
| Nombre de variables inconnues | 2 | R , x_{A,R} |
| Nombre d'équations indépendantes | 2 | Bilan global + bilan partiel de A |
| Nombre de relation supplémentaires | 0 | Aucune relation supplémentaire |
| NDF | 0 | NDF = 2 - 2 - 0 = 0 |

II.2.5 Analyse de procédés multi-opérations

Comme indiqué au § II.2.4, on doit tracer les frontières qui identifient les différents systèmes pour lesquels on écrit les équations de bilan. On doit d'abord commencer par tracer les frontières autour de chaque appareil, ensuite autour des nœuds et enfin autour de l'ensemble du procédé. La seconde étape est de vérifier quel est le nombre d'équations de bilan que l'on peut écrire pour chaque système tracé ; en sachant qu'on peut écrire autant d'équations que de composants traversant le système. On rassemble, enfin, d'autres informations pour établir d'autres relations supplémentaires. A partir de tous cela, on calcule le nombre de degrés de liberté.

Exemple 1 : Schéma de circulation d'un procédé d'extraction liquide – liquide

On désire séparer un mélange acétone – eau par extraction liquide – liquide. Le solvant utilisé pour extraire l'acétone est le méthylisobutylcétone (MIBC).

Le courant alimentant la colonne d'extraction contient 10% en masse d'acétone. Le courant solvant est constitué de solvant frais plus du solvant recyclé. A la sortie deux courants sont récupérés, le raffinat et l'extrait. Ce dernier est envoyé dans une colonne de distillation. Le courant distillat est riche en acétone. Le courant résidu, riche en MIBC, est renvoyé dans la colonne d'extraction pour être mélangé au solvant frais.

Le distillat doit contenir 90% de l'acétone de l'alimentation avec un rapport de 1 à 4 en MIBC.

- Proposer un schéma de circulation du procédé. Donner les caractéristiques et les informations supplémentaires dont vous disposez pour chaque courant.

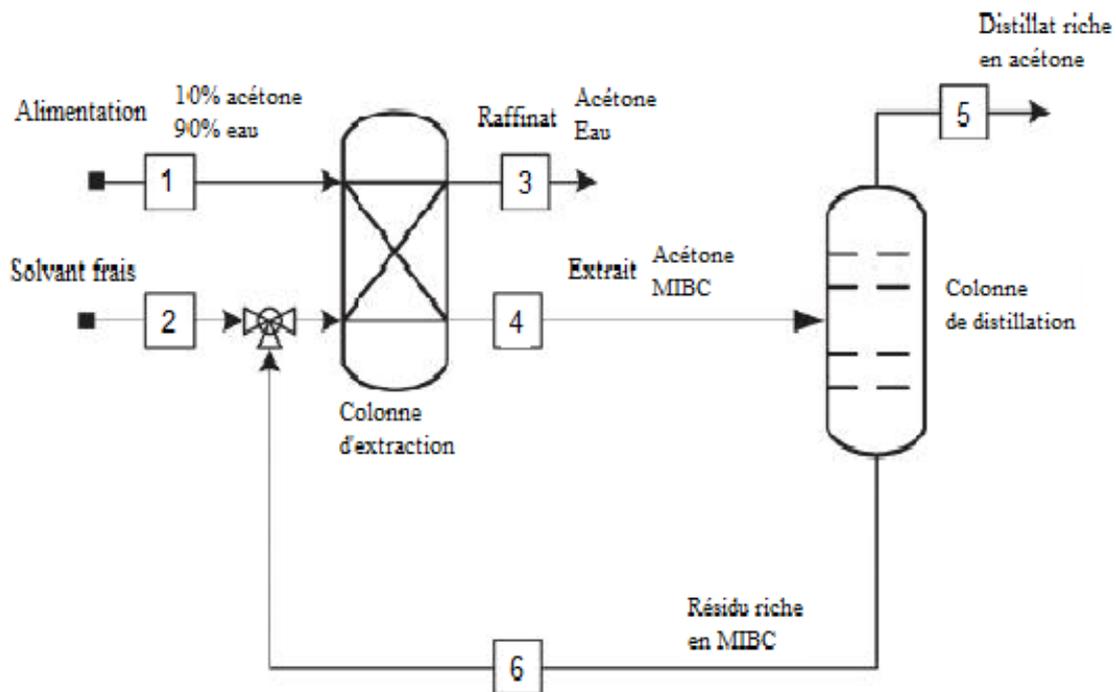


Figure II.18 : Procédé d'extraction avec régénération du solvant