

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE CHIMIE INDUSTRIELLE

Mémoire de Fin d'Etude en Vue de L'Obtention du Diplôme de
Master

SPECIALITE : Génie Chimique
OPTION : Génie Chimique

THEME

**ETUDE DYNAMIQUE D'UNE
COLONNE D'ABSORPTION**

Présente par :

SAHRAOUI Nora & BOUZEKRI Hadjer

Président : M^{er} D. LAIADI

Examineur : M^{er} ABD ALKARIM. MARZOUGUI

Encadreur : M^{er} A.HASSEINE

Promotion juin 2011

REMERCIEMENT

D'abord nous remercions DIEU de nous avoir venu en aide pour que nous puissions aboutir à la réussite

On adresse des vifs remerciements à mon encadreur, Dr A. HASSEINE pour sa supervision, ses remarques pertinentes, ses conseils et son soutien.

Egalement, mes sincères remerciements à Monsieur D. BARKAT le chef de département.

Mes plus profonds remerciements vont à Monsieur LAJADHI d'avoir accepté la charge de président de jury.

Aussi, nous sommes très honorées de la présence du Monsieur K. MARZOUQU, et on le remercie d'avoir accepté notre invitation à participer à ce jury.

Sans oublier les personnes qui font toute leurs efforts pour me faciliter le travail: FATIMA GHABGHOUR et AIDAOU AHLEM.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, trouvent ici l'expression de ma gratitude.

NOMENCLATURE

CHAPITRE I

D_A : Coefficient de diffusion de A dans le milieu considéré (m/s).

N_A : Flux transféré par unité d'aire interfaciale (mole/m.s).

Z : Distance de transfert (m).

C_A : Concentration du composé A dans la phase liquide (mole/ m).

P_A : Pression partielle du composé A dans la phase gazeuse (atm).

H : Etant la constante de HENRY ;

P_t : Pression totale du système ;

y : La composition de la phase gazeuse ;

x : La composition de la phase liquide ;

i : Représente l'étape i ;

α : Paramètre d'équilibre.

CHAPITRE II

$u(t)$: Représente l'entrée de système ;

$y(t)$: Représente la sortie de système

τ : La constante de temps (homogène au temps) ;

k : Le gain statistique.

x_i : Le variable d'état ;

u_i : Le variable d'entrée ;

n : Variables d'état ;

m : Variables d'entrée(u) ;

r : Variables de sortie ;
A : Matrice d'état, dynamique ou matrice d'évolution ;
B : Matrice d'entrée ou de commande ;
C : Matrice de sortie ou d'observation ;
D : Matrice de transmission direct ;
 x : Vecteur d'état ;
 u : Vecteur d'entrée ou de commande ;
 y : Vecteur de sortie ou d'observation ;
I : Représente la matrice carrée identité de dimension n ;
 s : Représente la variable de Laplace ;
 λ : Valeur propre (scalaire) ;
 v_i : Vecteur propre (vecteur).

CHAPITRE III

L : débit molaire liquide ;
V : débit molaire de vapeur ;
M : Rétention de liquide ;
W : Rétention de vapeur ;
 x_f : composition de liquide au niveau d'alimentation ;
 x_n : composition de liquide au niveau de la sortie ;
 y_1 : composition de vapeur au niveau d'alimentation ;
 y_{n+1} : composition de vapeur au niveau de la sortie ;

LISTE DE FIGURE

Figure I.1 : Distribution du soluté A à l'équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide à une température donnée.

Figure I.2 : Différents types de contacteurs gaz-liquide.

Figure 1.3 : (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.

Figure I.4. Différents arrangements de distribution des phases dans les colonnes à garnissage.

Figure I.5 : Exemple d'une colonne d'absorption à courant croisé.

Figure II.1 : Les étapes de la construction d'un modèle mathématique pour un cas concret.

Figure III.1 : Colonne d'absorption à n étages.

Figure III.2 : Une étape typique d'absorption de gaz.

FIGURE III .3 : Réponse de la composition du plateau inférieur pour une augmentation échelon de 0,05 au niveau d'alimentation vapeur, à l'instant $t = 0$.

FIGURE III .4 : Réponse de la composition du plateau supérieur à une augmentation échelon de 0,05 au niveau de l'alimentation vapeur, à l'instant $t = 0$.

Figure III.5 : Réponses de la composition d'étages à un avancement d'échelon de 0,05 de l'alimentation de vapeur, à l'instant $t = 0$.

Figure III.6 : Réponse de la composition normalisée des étages à une augmentation échelon de 0,05 au niveau de l'alimentation vapeur, à l'instant $t = 0$.

Figure III.7 : Réponse de la composition du plateau inférieur à une augmentation échelon de 0,025 au niveau de l'alimentation liquide, à l'instant $t = 0$.

Figure III.8 : Réponse de la composition du plateau supérieur à une augmentation échelon de 0,025 au niveau de l'alimentation liquide, à l'instant $t = 0$.

Figure III.9 : Réponses de la composition des étages à une augmentation échelon de 0,025 au niveau d'alimentation liquide, à l'instant $t = 0$.

Figure III.10 : Réponse de la composition normalisée des étages à une augmentation échelon au niveau de 0,025 d'alimentation liquides à $t = 0$.

Figure III.11 : Modèle de simulation dynamique.

Figure III.12 : Réponses des compositions liquide et vapeur relatives aux perturbations.

Figure III.13 : Réponse du système en fonction de sa fonction de transfert.

INTRODUCTIONS GENERALE

Dans les fabrications chimiques les ingénieurs des procédés sont généralement, des responsables de techniques de dépannage dans les opérations ; des responsables de concevoir des systèmes de commande de rétroaction de sorte que les variables de processus (telles que la température, la pression, ou la concentration) peut être maintenues aux valeurs désirées, d'autres peuvent être responsables de la refonte de procédés chimiques pour fournir plus de rentabilité. Toutes ces responsabilités exigent une compréhension du comportement des processus chimiques dépendant du temps (dynamique).

Les processus de séparations jouent un rôle important dans la plupart des procédés de fabrication de produits chimiques. Les jets de réacteurs chimiques contiennent souvent un certain nombre de composants; certains de ces composants doivent être séparés des autres composants pour la vente comme un produit final, ou pour une utilisation dans un autre processus de fabrication. Un exemple courant d'un processus de séparation est *l'absorption des gaz*, ce qui est normalement utilisé pour supprimer un élément dilué dans un mélange gazeux [1].

Dans ce mémoire on se fixe comme objectif l'étude dynamique d'une colonne d'absorption en appliquant des perturbations au niveau des alimentations (liquide et vapeur), le travail sera organisé de la manière suivante :

- Une introduction générale donnant une idée sur l'intérêt du thème, trois chapitres et une conclusion générale.
- Dans le chapitre I, on réuni toutes les informations disponibles dans la littérature pour caractériser et expliquer le phénomène de l'absorption et les types des colonnes d'absorption. Des définitions ainsi que des notions de bases sont brièvement rappelées.
- Le chapitre II, sera consacré à la présentation des méthodes de modélisation, analyse et simulation des systèmes dynamiques.
- Le modèle dynamique de notre système et l'effet de perturbation sur notre colonne feront l'objet du 3^{ème} chapitre.

INTRODUCTIONS GENERALE

Dans les fabrications chimiques les ingénieurs des procédés sont généralement, des responsables de techniques de dépannage dans les opérations ; des responsables de concevoir des systèmes de commande de rétroaction de sorte que les variables de processus (telles que la température, la pression, ou la concentration) peut être maintenues aux valeurs désirées, d'autres peuvent être responsables de la refonte de procédés chimiques pour fournir plus de rentabilité. Toutes ces responsabilités exigent une compréhension du comportement des processus chimiques dépendant du temps (dynamique).

Les processus de séparations jouent un rôle important dans la plupart des procédés de fabrication de produits chimiques. Les jets de réacteurs chimiques contiennent souvent un certain nombre de composants; certains de ces composants doivent être séparés des autres composants pour la vente comme un produit final, ou pour une utilisation dans un autre processus de fabrication. Un exemple courant d'un processus de séparation est *l'absorption des gaz*, ce qui est normalement utilisé pour supprimer un élément dilué dans un mélange gazeux [1].

Dans ce mémoire on se fixe comme objectif l'étude dynamique d'une colonne d'absorption en appliquant des perturbations au niveau des alimentations (liquide et vapeur), le travail sera organisé de la manière suivante :

- Une introduction générale donnant une idée sur l'intérêt du thème, trois chapitres et une conclusion générale.
- Dans le chapitre I, on réuni toutes les informations disponibles dans la littérature pour caractériser et expliquer le phénomène de l'absorption et les types des colonnes d'absorption. Des définitions ainsi que des notions de bases sont brièvement rappelées.
- Le chapitre II, sera consacré à la présentation des méthodes de modélisation, analyse et simulation des systèmes dynamiques.
- Le modèle dynamique de notre système et l'effet de perturbation sur notre colonne feront l'objet du 3^{ème} chapitre.

CHAPITRE I**REVUE BIBLIOGRAPHIQUE****I.1. INTRODUCTION**

L'absorption est une opération unitaire de génie des procédés caractérisée par un transfert de matière d'une phase à une autre. Parfois ce transfert de matière est accompagné d'un transfert de chaleur. L'absorption met en jeu des échanges de matière entre une phase gazeuse et une phase liquide de nature chimique différente, (un ou plusieurs constituants de la phase gazeuse passent en phase liquide). Cette opération est principalement utilisée pour purifier un flux gazeux ou pour récupérer un constituant présent dans un mélange gazeux [2].

Cette opération 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. Les opérations ont pour caractéristique commune que le transfert du soluté d'une phase à l'autre a lieu par des phénomènes de diffusion exigeant un bon contact entre les phases. Dans l'absorption, les gaz diffusent principalement dans le sens gaz-liquide et très peu dans le sens inverse[2].

L'absorption est uniquement physique lorsque le soluté ne réagit pas avec des constituants de la phase liquide. Afin d'augmenter le transfert du composé de la phase gazeuse vers la phase liquide, une réaction chimique phase liquide peut également être mise en oeuvre[3].

Le procédé d'absorption implique la séparation d'un mélange gazeux par un solvant liquide. L'opération inverse, c'est-à-dire, extraire le gaz d'un liquide est appelé strippage. Le but du procédé d'absorption est de transférer le soluté contenu dans un gaz vers un solvant liquide. Il s'agit, soit de purifier un gaz de certains constituants indésirables, soit de récupérer un gaz désiré du mélange[4].

Le contact est réalisé dans une colonne à plateaux ou à garnissage, appelé absorbeur. Le solvant pauvre est introduit en tête de colonne et descend à contre courant du gaz riche qui remonte la colonne [4].

I.2. LES TERMES DE PHENOMENE D'ABSORPTION

Les termes de la phénomène d'absorption sont [5] :

- *Le soluté ou absorbat* : 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 ;
- *Gaz riche* : le mélange gazeux entrant diluant – soluté ;
- *Gaz pauvre (épuisé)* : le gaz sortant, dépourvu plus ou moins complètement du soluté ;
- *L'absorbant ou solvant* : est le liquide destiné à dissoudre le soluté ;
- *La solution riche* : est le liquide obtenu par dissolution du soluté dans le solvant ;

I.3. CARACTERES GENERAUX

Le processus de l'absorption, c'est-à-dire le passage d'un soluté dans un solvant dépend de la solubilité à l'équilibre du soluté dans le liquide et de la vitesse de transfert ou de diffusion du premier dans le second [5].

I.3.1. La 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. Elle est indiquée par deux méthodes :

- ✓ *Tables de solubilité* : Ces tables expriment la teneur du gaz dans la solution et la pression partielle du gaz au-dessus de la solution, pour l'équilibre, à température constante.
- ✓ *Diagramme de solubilité* : Les graphes, lignes ou courbes de solubilité à diverses températures ou isothermes de solubilité donnent, pour la température choisie, la variation de la pression partielle du gaz en.

1.3.2. 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.

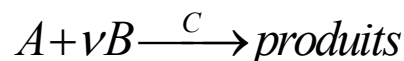
I.4. LES TYPES D'ABSORPTION

On peut définir deux types d'absorption " physique et chimique " :

1.4.1. L'absorption chimique

Elle correspond à la dissolution d'un soluté dans un liquide avec formation d'un composé chimique plus ou moins stable.

Généralement les procédés industriels d'épuration d'effluents liquide et gazeux, mettent souvent en oeuvre une réaction chimique en phase liquide. Si on considère un système gaz-liquide contenant un gaz absorbé A qui réagit de façon réversible ou irréversible avec un réactif B dissous dans le liquide. Le composé A est transféré de la phase gaz vers la phase liquide où il se dissout et réagit avec B, en présence du catalyseur C.



L'absorption d'un gaz accompagnée de réaction chimique en phase liquide permettra d'améliorer l'efficacité de la séparation (par exemple l'absorption du CO₂ dans une solution aqueuse de carbonate, d'amine, etc....) , et la sélectivité de la séparation (par exemple l'absorption du CO₂ et H₂S dans des solutions d'éthanol amine) [6] .

1.4.2. L'absorption physique

Lors de l'absorption gaz-liquide sans réaction chimique, le soluté est transféré à travers l'interface de la phase gazeuse vers la phase liquide, puis dissolution dans la phase liquide, sans donner lieu à une réaction chimique.

Dans ce type d'opération le constituant absorbé ne réagit pas avec le solvant. La concentration à l'équilibre du constituant absorbé dépend fortement de la pression partielle dans la phase gazeuse[3].

1.4.2.1. Transfert de matière entre phases

L'absorption est le phénomène global du passage d'un gaz contenu dans un mélange gazeux, ou dans gaz pur, dans une solution liquide, Tous les modèles théoriques de transfert de matière en phase liquide ont pour but, de permettre une analyse de la migration du soluté gazeux vers la phase liquide dans les appareils d'absorption. Le flux de transfert de matière est donné peut être par la loi de Fick [7] :

$$N_A = -D_A \cdot \frac{\partial C_A}{\partial Z}$$

D_A : Coefficient de diffusion de A dans le milieu considéré (m/s).

N_A : Flux transféré par unité d'aire interfaciale (mole/m.s).

Z : Distance de transfert (m).

1.4.2.1.1. Le concept d'équilibre

La condition essentielle pour qu'il ait transfert de matière ou diffusion entre deux points situés à l'intérieur d'une seule phase, est donc l'existence d'un potentiel, la plupart du temps exprimé sous forme d'une différence de concentration. Si on envisage maintenant le passage d'un composé d'un mélange d'une phase à une autre, on s'aperçoit que ce concept de différence de concentration n'est plus adéquat.

Il faut donc modifier le critère de potentiel et introduire la notion d'équilibre entre phases. Cet équilibre peut exister entre deux phases liquides ou entre une phase liquide et une phase gazeuse ...etc.

Donc, dans le cas d'un système hétérogène (c-à-d deux phases en contact), la quantité maximale de matière pouvant passer d'une phase à l'autre peut être estimée à partir des principes d'équilibres entre phases. Dans un système à l'équilibre, il n'y a pas de diffusion du composé entre les deux phases. La diffusion du composé entre les phases se produit afin de mener le système vers des conditions d'équilibre. Si le temps de contact est suffisant, les concentrations d'équilibre pourront être observées [8].

La courbe d'équilibre représentant la distribution d'un composé entre une phase gazeuse et une phase liquide à l'équilibre est représentée sur la figure I.1

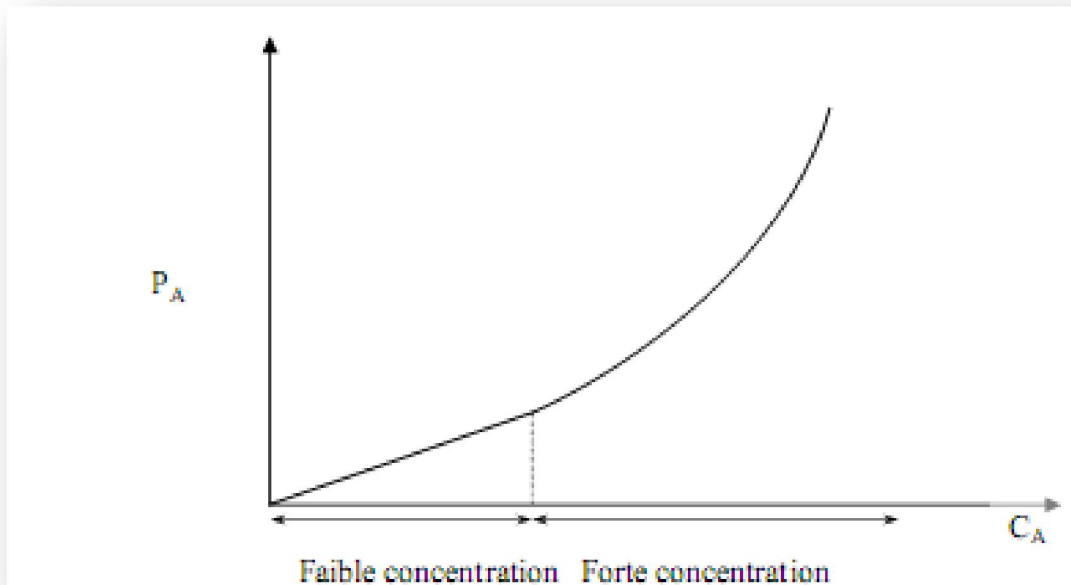


Figure I.1 : Distribution du soluté A à l'équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide à une température donnée[3].

Avec :

C_A : Concentration du composé A dans la phase liquide (mole/ m).

P_A : Pression partielle du composé A dans la phase gazeuse (atm).

Dans la zone des faibles concentrations (solutions diluées), la courbe d'équilibre est caractérisée par une droite. Celle-ci peut être exprimée par une relation linéaire, connue sous le nom de «loi de HENRY ». À l'équilibre de dissolution, il y a toujours proportionnalité entre la pression partielle du soluté dans la phase gazeuse et sa concentration dans la phase liquide (loi de HENRY) [3].

La loi de HENRY étant :

$$P_A = H \cdot C_A$$

Où :

H : Etant la constante de HENRY,

C_A : Etant la concentration à l'équilibre dans la phase liquide du composé A ;

(mole/ m).

P_A : Etant la pression partielle à l'équilibre dans la phase gazeuse du composé A. (atm).

En addition, les lois de Dalton 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.

▪ Loi de DALTON

D'autre part, la formule de HENRY se transforme en tenant compte de la formule de DALTON, valable avec les gaz parfaits :

$$p = y \cdot P_t$$

p : pression partielle du soluté dans la phase gazeuse

y : titre molaire du soluté dans la phase gazeuse.

P_t : pression totale du système.

Le coefficient m joue le rôle que même rôle que le coefficient de partage dans l'extraction liquide-liquide. Cette formule est utilisée parfois pour tracer la courbe de distribution exprimée en titres molaires : droite passant par l'origine des axes de coordonnées[3].

▪ **Loi de RAOULT**

C'est une loi limite valable pour les mélanges parfaits (ou idéaux), c'est-à-dire constitués de corps de structures voisines. A température constante, pour un gaz en équilibre avec une solution idéale, la pression partielle du soluté dans la phase gazeuse est égale au produit de la pression maximale de vapeur du soluté par son titre molaire dans la solution.

$$p = x \cdot P^0$$

I.4.2.1.2. Modeles de presentation du transfert entre phases

Durant le processus d'absorption, il y a des nombreux modèles qui représentent le transfert de matière entre phases (liquide et gaz) les plus connus de ces modèles sont[7] :

- ✓ Modèle du double film de LEWIS et WHITMAN (1924) ;
- ✓ Modèle de la pénétration de HIGBI (1935) ;
- ✓ Modèle de DANCKWERTS (1951).

I.4.2.2. La relation d'équilibre

Le rapport entre les compositions de composant (i) dans la phase liquide et la phase vapeur (gaz) peut être exprimé par la relation suivante [9] :

$$y_i = \alpha x_i$$

Où :

y : la composition en phase gazeuse (moles de soluté / mole de liquide inerte)

x : la composition de la phase liquide (moles de soluté / mole de vapeur inerte)

i : représente l'étape i (phase i)

α : paramètre (constante) d'équilibre (dépend de composition, de température et par fois de volatilité) .

1.5. LES TYPES D'ABSORBEURS

Selon le système considéré, notamment en fonction des vitesses caractéristiques de transfert, de transport ou de réaction, l'absorbeur devra être choisi soit en fonction de ses performances du point de vue transfert de matière soit en fonction du volume de liquide mis en jeu. En conséquence, les absorbeurs utilisés dans l'industrie ont des formes très diverses[4] :

- réacteurs tubulaires à bulles, à gouttes, à film tombant, à garnissage, à plateaux ;
- réacteurs à cuve agitée mécaniquement ;
- réacteurs du type jets ou venturis.

Les différents types d'absorbeurs gaz-liquide utilisés industriellement sont classés en fonction de la rétention en liquide (volume du liquide par unité de volume de l'absorbeur):

- *forte rétention* : colonne à bulles, cuve agitée, jet immergé ;
- *rétention moyenne* : colonnes à plateau et à garnissage ;
- *faible rétention* : colonnes à film et à pulvérisation, venturi, éjecteur.

L'absorption est réalisée dans ces absorbeurs, le plus souvent, à contre courant (étages multiples ou à contact continu), par introduction du gaz à la base et du solvant à la partie supérieure, le gaz diluant étant recueilli en tête tandis que la solution est soutirée à la partie inférieure[3].

Les différents types d'absorbeurs sont illustrés sur la figure II.1.

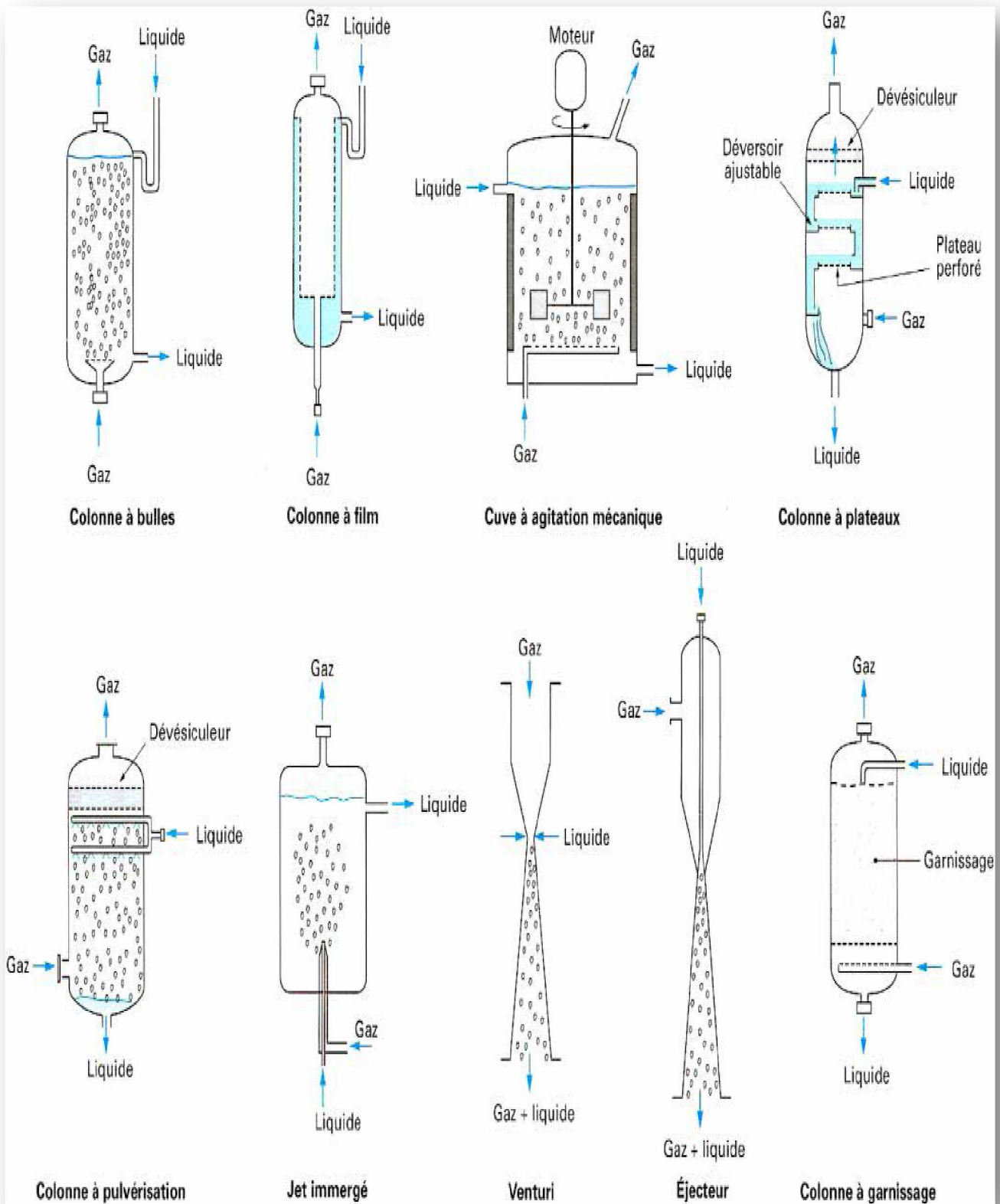


Figure I.2 : Différents types de contacteurs gaz-liquide [4].

I.6. BUT ET PERFORMANCES DES ABSORBEURS

Les absorbeurs ont tous pour but de réaliser le meilleur échange de matière entre une phase liquide et une phase gazeuse en contact. Ils doivent donc être équipés de dispositifs internes qui, d'une part, favorisent la dispersion de la phase gazeuse dans la phase liquide, plus particulièrement provoquent la plus grande surface d'aire interfaciale, et d'autre part, permettent la séparation de la phase gazeuse et de la phase liquide [2].

Les performances globales des absorbeurs, rendement et sélectivité, dépendent des phénomènes mis en jeu, à savoir [4]:

- les équilibres thermodynamiques à l'interface (solubilités) ;
- les lois de transport dans les phases (diffusivités) ;
- les lois de transfert au voisinage des interfaces (coefficients de transfert, aires interfaciales) ;
- les cinétiques des réactions chimiques (schémas réactionnels, constantes cinétiques, ordres de réactions).

I.7. LES COLONNES A BULLES

La forme classique d'une colonne à bulles est schématisée dans la figure I.1. d'une manière générale, le rapport hauteur sur diamètre est supérieur à (3 à 10m), quoi que de gros fer menteurs de ce type soient parfois assez trapus, les injections se font par des tubes perforés ; par les plateaux perforés, plus rarement par des plaques frittées [4].

I.8. LES COLONNES À GARNISSAGE

I.8.1. Description et principe de fonctionnement

Une colonne à garnissage est une colonne qui est remplie d'éléments permettant d'augmenter la surface de contact entre la phase gazeuse et la phase liquide. Ce sont ces éléments qui constituent le garnissage [2,4].

Les garnissages : les garnissages sont des pièces formées régulièrement en métal, céramique, verre, graphite, ou matière plastique. Ils sont utilisés dans les colonnes sous forme de remplissage en vrac. La figure I.3 illustre les différents types de garnissage utilisés [11].

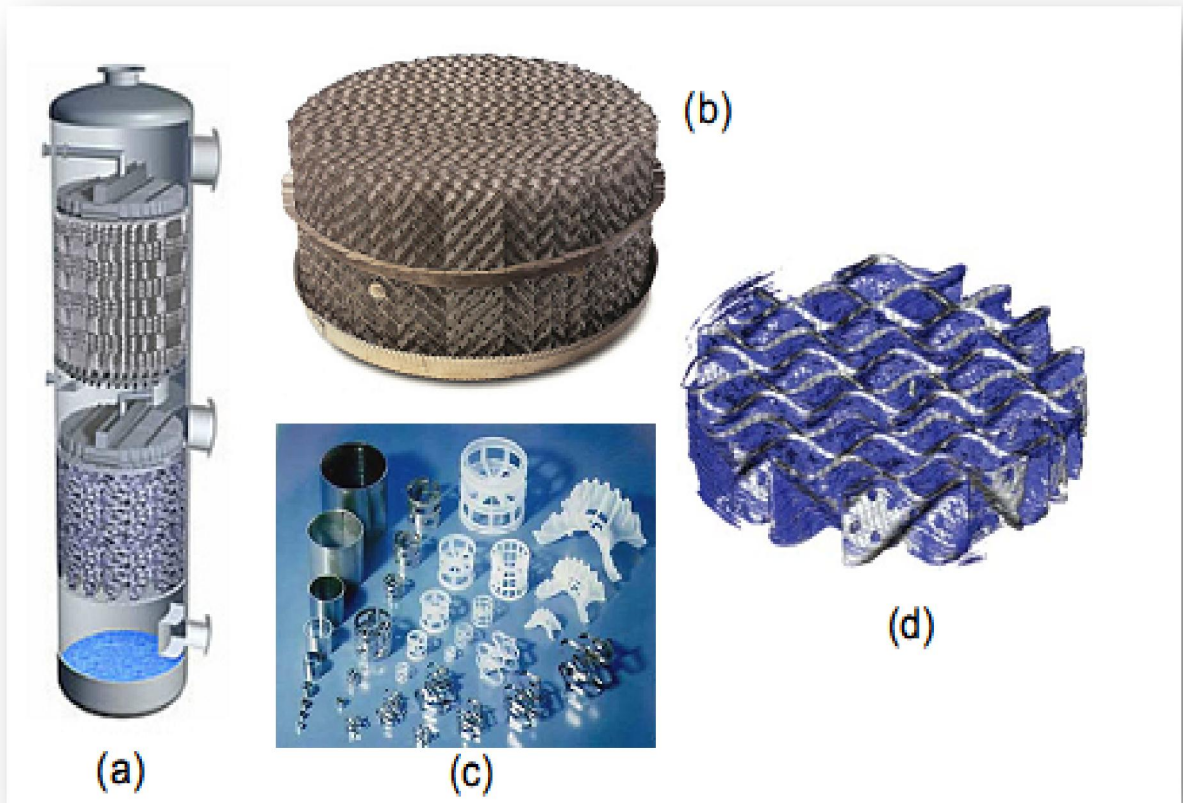


Figure 1.3 : (a) Schéma d'une colonne à garnissage, (b) Garnissage structuré, (c) Garnissage en vrac, (d) Image d'un ruissellement de film liquide le long d'un garnissage[2]

La colonne contient également [2]:

- dans sa partie inférieure, un plateau pour supporter le garnissage et un injecteur de gaz ;
- dans sa partie supérieure, un distributeur de liquide et parfois un dévésiculateur ;
- parfois un redistributeur.

En considérant la façon d'alimenter la colonne en gaz et en liquide, on peut distinguer trois types de colonnes [2]:

- à contre courant ;
- à co-courant ;
- à flux croisé.

Dans les colonnes à garnissage, le liquide est pulvérisé sur le garnissage placé entre des grilles. La phase liquide qui contient l'absorbant, forme un film sur les éléments de garnissage (zone de mouillage). Le garnissage qui crée une série d'obstacles sur le parcours du liquide et du gaz au sein de la colonne permet [2]:

- d'augmenter la surface de contact entre les deux phases;
- d'augmenter le temps de séjour des deux phases dans la colonne et donc leur durée de contact ;
- de créer un régime turbulent de la phase gazeuse.

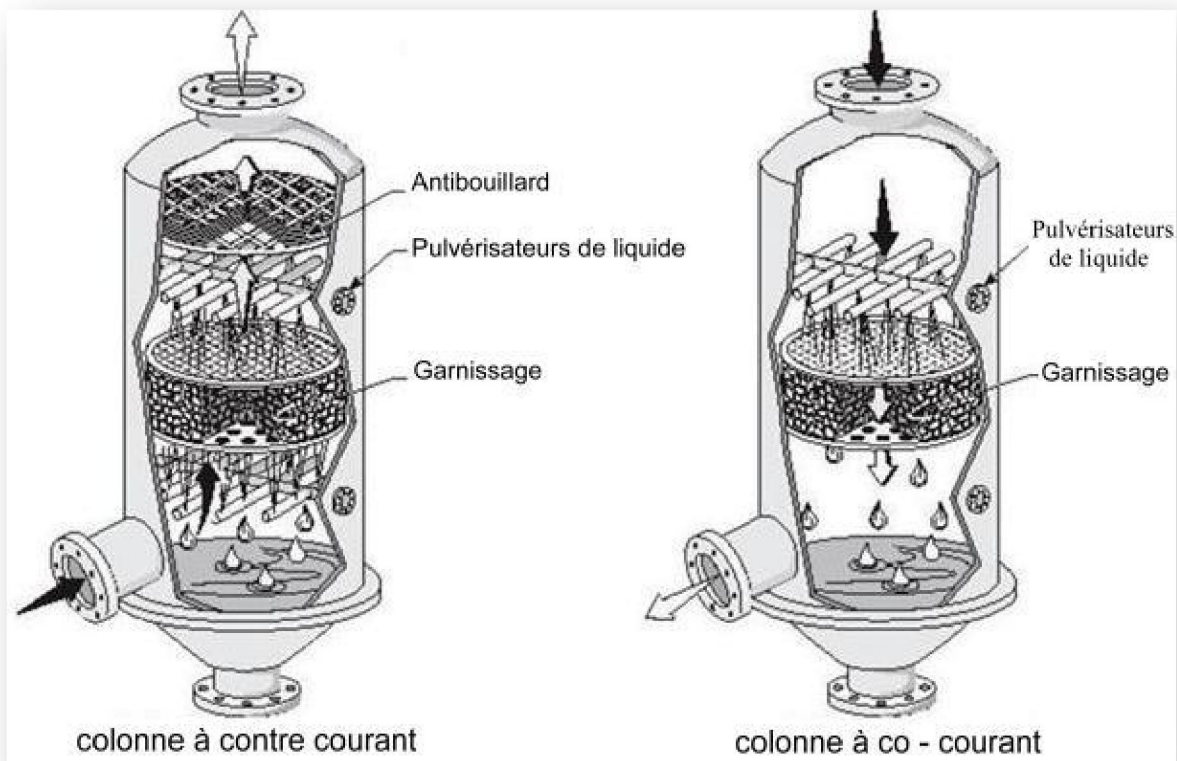


Figure I.4. Différents arrangements de distribution des phases dans les colonnes à garnissage [2].

1.8.2. Caractéristiques de fonctionnement

Les colonnes garnies peuvent avoir une grande efficacité. L'efficacité pour une colonne donnée, dépend d'un grand nombre de facteurs, à savoir [2] :

- la vitesse du gaz ;
- la solubilité du polluant dans la solution ;
- la concentration de l'absorbant dans la solution ;
- la réactivité éventuelle du gaz avec les constituants du liquide ;

- la diffusivité du polluant dans la phase gazeuse et de l'absorbant dans la phase liquide ;
- la teneur en polluant de la phase gazeuse ;
- la hauteur de la colonne.

Un des paramètres très important pour le dimensionnement des colonnes à garnissage est la perte de charge, car c'est elle qui limite le débit du gaz introduit dans la colonne.

La perte de charge est proportionnelle [2]:

- ✓ au carré de la vitesse de propagation du gaz au sein de la colonne ;
- ✓ à la masse volumique du gaz ;
- ✓ elle augmente également avec le débit du liquide .

I.9. LES COLONNES A PLATEAUX

Les colonnes à plateaux ont à l'origine été inventées pour la distillation, mais elles peuvent également être utilisées comme absorbeur. Les plateaux munis de déversoirs sont particulièrement bien adaptés pour l'absorption, mais en fait, tous les types de plateaux peuvent être utilisés.

Les plateaux, éléments actifs d'une colonne, sont en fait conçus pour assurer la dispersion de la phase gazeuse au sein du liquide en utilisant directement l'énergie de pression de cette phase gazeuse. Les dispositifs de dispersion divisent la vapeur en jets indépendants et augmentent la surface de contact avec le liquide.

Au sein des colonnes à plateaux, le mouvement de la phase liquide a toujours lieu du haut vers le bas.

Le passage du gaz se fait de plateau à plateau par des orifices dont la taille et la forme peuvent être très variables. Le liquide passe le plus souvent de plateau à un plateau par des conduites de descente à déversoirs (down-corners) situées le long de la paroi de la colonne, parfois aussi au centre pour des colonnes de très grand diamètre[11].

Mis à part certains dispositifs, dans leur ensemble, les plateaux peuvent être classés en deux grandes catégories[11] :

- les plateaux à courants croisés,
- les plateaux à contre-courant.

I.9.1. PLATEAUX A COURANTS CROISES

I.9.1.1. Principe de fonctionnement

Dans les colonnes à plateaux à courants croisés, la phase gazeuse ascendante traverse le liquide qui se déplace horizontalement sur le plateau. Un barrage de sortie maintient sur le plateau une couche de liquide, qui s'écoule par gravité d'un plateau à l'autre, par une conduite[11].

La perte de charge sur un plateau est le résultat de :

- la perte de charge du gaz au travers des trous du plateau,
- la hauteur de liquide sur le plateau,
- l'aération du liquide.

En pratique, la perte de charge est de l'ordre de 2 fois la hauteur de liquide sur le plateau soit environ 100 mm de liquide[11].

I.9.1.2. Différents types de plateaux à courants croisés

Il existe différents types de plateaux qui varient selon les producteurs. Le choix du plateau dépend principalement du débit du liquide, de la souplesse d'utilisation souhaitée et du coût de l'installation. Les principaux types de plateaux sont[11] :

- Plateaux à calottes ;
- Plateaux perforés ;
- Plateaux à soupapes ;
- Plateaux à tunnels.

I.9.1.3. avantages et inconvénients des plateaux a courants croises

Les plateaux à courants croisés sont plus souvent utilisés que les plateaux à contre-courant, car l'efficacité de transfert de la matière est meilleure et ils ont une plus grande échelle de fonctionnement. Ils peuvent fonctionner avec des débits de liquide très faibles.

Un des inconvénients de ce type de colonnes est la réduction de la surface de contact, de la surface d'échange entre les deux phases qui est due à la présence des trop-pleins. Les trop-pleins doivent en effet être suffisamment grand pour assurer un bon écoulement du

liquide des plateaux supérieurs aux plateaux inférieurs. De plus, du gaz peut passer par ces trop pleins[11].

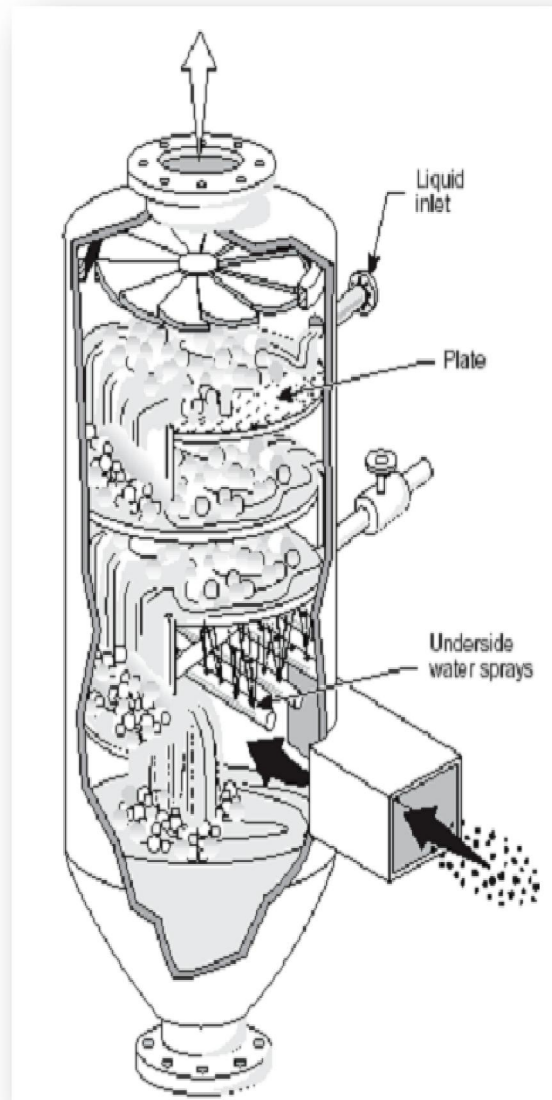


Figure I.5 :Exemple d'une colonne d'absorption a courant croisé[11].

1.9.2. Les plateaux à contre-courant

1.9.2. 1. Description

Les plateaux à contre-courant ne sont composés que de deux zones :

- zone implantée d'orifices pour permettre l'écoulement du gaz et du liquide ;
- zone périphérique.

Les plateaux à contre-courant sont caractérisés par l'absence de trop-plein. Les organes de barbotage, constitués exclusivement par des trous et des fentes permettant à la fois l'ascension de la phase gaz et la descente du liquide[12].

Les colonnes à contre-courant sont généralement équipées de plateaux :

- ✓ Perforés sans déversoir,
- ✓ Turbogrid.

1.9.2. 1. 1. Types de plateaux à contre-courant

1.9.2. 1. 1.1. Plateaux perforés sans déversoir

Dans le cas des plateaux perforés sans déversoirs, les trous sont plus grands que dans les plateaux avec déversoir, car le liquide passe par les mêmes orifices que le gaz [12].

1.9.2. 1. 1.2. Plateaux Turbogrid

Ce type de plateau a été inventé par Shell. Son principe, est le suivant : des barreaux égaux, parallèles et équidistants, de section rectangulaire forment un plancher ajouré horizontal.

Ce plateau a le gros avantage de pouvoir être construit en matériau quelconque. Il ne peut fonctionner que dans une zone étroite de débits. Son fonctionnement est semblable à celui des plateaux perforés sans déversoir [12].

1.9.2. 1. 2. Avantages/inconvénients des plateaux à contre-courant

Les avantages des plateaux à contre-courant sont leur faible coût, leur simplicité et leur résistance à l'encrassement. La faible rétention du liquide est également un avantage pour les opérations discontinues. Leur principal inconvénient est leur manque de souplesse[12].

1.9.2. 1. 3. Domaine d'application

Les colonnes à plateau sont utilisées pour [12]:

- des opérations de distillation
- des opérations d'absorption sans réaction chimique ou impliquant des réactions chimiques ayant une vitesse moyenne.

1.9.2. 2. 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) ;
- Elles sont plus économiques par rapport au colonne à garnissage pour les processus nécessitant un débit de liquide important ;
- 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[12].

1.9.2.3. Problèmes rencontrés dans les colonnes à plateaux

1.9.2. 3.1. Pleurage

Il y a pleurage lorsque le liquide s'écoule d'un plateau à un autre par les orifices du plateau. Ce phénomène peut avoir lieu si les trous dans le plateau sont trop grands ou si le débit de gaz est trop faible. En effet, si la pression du gaz passant par un orifice n'est pas suffisante pour créer une bulle et supporter la charge du liquide, ce dernier commence à s'écouler par les trous[13].

1.9.2. 3.1.2. Engorgement

Pour des débits de gaz et de liquide trop importants, on peut atteindre les limites suivantes :

- Engorgement des trop-pleins :

Pour bien dégazer le liquide, il faut que la vitesse verticale du mélange soit inférieure à la vitesse d'ascension des bulles de gaz. Si le débit de liquide est trop important, la vitesse du liquide dans la zone des trop-pleins sera trop grande et les trop-pleins ne seront plus capables d'assurer leur fonction de dégazage. En raison également de la perte de charge qui sera trop élevée, le liquide ne pourra plus descendre sur le plateau inférieur, il ne sera plus canalisé[13].

- Engorgement par entraînement :

Si le débit du gaz augmente trop, à un moment, le mélange de liquide et de gaz peut former une émulsion. Cette émulsion peut remplir tout l'espace entre les plateaux et atteindre le plateau supérieur. Cela augmente fortement la perte de charge et diminue l'efficacité du plateau supérieur, et donc de la colonne[13].

1.9.2. 3.3. Entraînement

On parle de phénomène d'entraînement lorsque le liquide est transporté par le gaz d'un plateau au plateau supérieur. L'entraînement des gouttelettes de liquide sur le plateau supérieur est dû à une vitesse trop élevée du gaz dans la zone de contact des phases.

L'efficacité du plateau est réduite car il y a une diminution des forces motrices d'absorption due au versement du liquide du plateau moins volatile sur le plateau de plus grande volatilité. Dans ce cas, la colonne s'approche du point d'engorgement, car la quantité de liquide sur le plateau supérieur augmente[13].

1.9.2. 3.4. Mauvaise distribution du liquide

Ce phénomène engendre une réduction de la surface de contact entre les phases et une diminution de l'efficacité de la colonne[13].

Ce problème peut se produire lorsque :

- les plateaux ne sont pas placés horizontalement,
- le débit du liquide est trop grand,
- le débit du gaz est trop faible,
- il y a un problème mécanique avec le plateau.

I. 10. LA DYNAMIQUE DES COLONNES D'ABSORPTION

Une compréhension du comportement dynamique de processus chimique est importante pour deux perspectives « conception et commande ». Il est facile de concevoir un de processus chimique basé sur des considérations équilibrés, qui est pratiquement incontrôlable quand les dynamiques de processus sont considérées.

L'état actuel du matériel et du logiciel informatiques l'a rendu facile de simuler interactivement le comportement dynamique des processus chimiques.

L'étude de la dynamique des colonnes d'absorption est l'un d'exemples de ces études qui passe (l'étude dynamique) généralement par les étapes suivantes:

- La modélisation ;
- L'analyse ;
- Programmation et simulation (calculs, graphes.....etc.).

CHAPITRE II**MODILISATION, ANALYSE ET SIMULATION DES PROCÉDES
DYNAMIQUES****II.1. INTRODUCTION**

Le génie chimique de dimensionnement s'intéresse surtout à des systèmes en régime permanent et ne requiert pas nécessairement de connaissances spécifiques sur les évolutions temporelles des processus. Pour le contrôle et la régulation des procédés les aspects dynamiques sont essentiels car l'automatisation s'attache surtout à maîtriser les régimes transitoires. Pour comprendre la régulation, on ne peut donc ne pas faire l'économie d'un minimum d'outils mathématiques utiles pour la représentation dynamiques des systèmes et, par conséquent, pour la résolution des équations différentielles [14].

II.2. MODILISATION DES SYSTEMES

La première étape lors de la conception d'un système automatisé est la modélisation. Il est très important d'obtenir une représentation mathématique reproduisant aussi convenablement que possible le comportement du système à commander [17].

II.2.1. Notion de système

La définition du mot système compte tenue de la grande diversité des objets qu'elle recouvre, ne peut qu'être assez vague : un système est un ensemble d'éléments de nature diverse reliés entre eux par des lois naturelles ou imposées [14].

Un système peut être défini d'un point de vue réel ou d'un point de vue abstrait. Le point de vue réel concerne les systèmes physiques, concret, palpable. C'est un ensemble d'objets ou d'entités connectés et interagissant les uns avec les autres en fonction d'un objectif. Chaque composante du système peut elle-même être un sous-système ce qui conduit à des systèmes plus ou moins hiérarchisés et donc plus ou moins complexes. D'un point de vue abstrait, le système est assimilé à une maquette virtuelle, matérialisée par des symboles et

des équations, qui a pour qualité de représenter et de décrire au mieux le comportement et l'évolution du système dit réel [15].

Plusieurs types de variables physiques sont mis en jeux par les systèmes :

- Les variables d'entrées (notées u), appliquées au système à partir d'une source extérieur, vont entraîner une évolution de l'état de système. Ces variables pourront servis éventuellement à agir sur le procédé, à fin de mieux le maîtriser.
- Les variables de sortie (notées y) qui caractérisent la réponse de système à tout évènement de son « histoire » et, en particulier, aux variations temporelles des entrées.
- Le temps (noté t).

II.2.1.1. Les systèmes linéaires

Généralement l'étude des systèmes s'intéresse beaucoup plus à une principale propriété était la linéarité, autrement dit des systèmes pour lesquels s'applique le principe de la conservation, au niveau de sa sortie de la combinaison linéaire d'entrée, chaque $y(t)$ étant la sortie correspondant à $u(t)$ [16] :

$$u(t) = \beta_1 u_1(t) + \beta_2 u_2(t) + \beta_3 u_3(t) + \dots + \beta_n u_n(t)$$

$$y(t) = \beta_1 y_1(t) + \beta_2 y_2(t) + \beta_3 y_3(t) + \dots + \beta_n y_n(t)$$

Où :

$u(t)$: représente l'entrée de système ;

$y(t)$: représente la sortie de système.

β_1, \dots, β_n sont des constantes.

II.2.1.2. Les systèmes linéaires de premier ordre

Un système régi par une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants est dit « du premier ordre ». La forme canonique d'une telle équation est la suivante [14] :

$$\tau \frac{dy}{dt} + y(t) = K u(t)$$

τ : la constante de temps (homogène au temps) ;

k : le gain statistique.

La notion de gain est fondamentale : un simple facteur de proportionnalité entre la valeur de la sortie d'un processus et l'entrée qui a lui a donné naissance.

II.2.2. Définition de la modélisation

La modélisation est une représentation logique et mathématique du comportement du système réel dans un contexte donné et une problématique donnée. Le modèle prend dans la majorité de cas la forme d'une série d'hypothèses concernant le fonctionnement du système et qui sont exprimé à l'aide de relations mathématiques, logiques ou symboliques entre les entités (objets d'intérêt). Ces modèles sont dits analyses analytiques. Lorsque le système est assez complexe à modéliser de manière analytique [17].

Tout comme les systèmes qu'ils représentent, les modèles peuvent être également :

- a) Statique (indépendants du temps) ou dynamique (lorsqu'ils décrivent l'évolution du système dans le temps ou dans l'espace)
- b) Déterministes (lorsqu'ils dépendent de facteurs connus) ou stochastiques (ils dépendent de facteurs aléatoires, imprévisibles).
- c) Discrets ou continus.

II.2.3. Les étapes de modélisation

Modéliser un système passe par un certain nombre d'étapes usuelles [15].

1. Définir le problème ;
2. Définir le système : comprendre les relations et les interactions physiques entre les différents éléments constitutifs du système ;
3. Construire une représentation simplifiée et idéalisée du système à modéliser ;
4. Appliquer les lois décrivant les éléments constitutifs ou les interactions entre ces éléments ;
5. Définir les variables pertinentes, les entrées et les sorties ;
6. Formuler correctement le modèle obtenu, par d'éventuelles manipulations sur les équations
7. Si le modèle est non linéaire, déterminer les conditions d'équilibre et en déduire un modèle linéaire.

II.2.4. But de modélisation

Nous pouvons particulièrement mentionner que modéliser peut être avec succès employé [18]:

- Réduisez les coûts de fabrication ;
- Réduisez le temps et les coûts dans toutes les étapes du cycle de vie de processus ;
- Augmentez l'efficacité de processus ;
- Permettez une meilleure et plus profonde compréhension du processus et son Opération
- Soyez employé comme appui pour les solutions adoptées pendant le processus ;
- Développement et exploitation ;
- Assurez un transfert technologique facile du processus ;
- Augmentez la qualité du contrôle de processus industriel ;
- Indiquez les capacités de traiter des problèmes complexes ;
- Contribuez à réduire la pollution ;
- Améliorez la sûreté des usines ;
- Lancez les nouveaux produits sur le marché plus rapides ;
- Réduisez l'émission de rebut tandis que le processus est développé ;
- Améliorez la qualité des produits ;
- Assurez une haute qualité de la formation des opérateurs.

II.2.5. Types de modélisation des systèmes

Le système, tel qu'il va être défini, peut être vu de l'extérieur comme une boîte noire de l'intérieur si on a pu des variables intrinsèques intimes à son fonctionnement (variable d'état). La modélisation va conduire à deux formes générales qui seront étudiées dans cet ouvrage [15].

- *La modélisation ou description externe* ou de fonctionnement (ou encore modélisation entrée /sortie. La représentation de la relation entre l'entrée u et la sortie y est faite par une relation d'entrée-sortie.

$$y(t) = f(u(t), t)$$

Qui donne la sortie du système à l'instant t due à l'entrée $u(t)$. Cette approche est plus généralement faite par utilisation de fonctions de transfert. Il est habituel, dans le cas continu

d'utiliser une transformée de Laplace et d'exprimer la relation d'entrée-sortie par une fonction de transfert.

- *La modélisation ou description interne* ou de connaissance. Elle utilise les principes et les lois de la discipline concernée par le problème de modélisation. Elle peut aussi nécessiter un ensemble de données expérimentales. Ce sont en général des équations exprimant la continuité, la conservation de grandeurs physiques telle que la masse, l'énergie ...etc. Pour cela, on introduit la notion d'état du système. C'est-à-dire des grandeurs physiques décrivant et résumant l'histoire du système. En représentation interne, les modèles peuvent être décrits mathématiquement par des équations différentielles, des équations aux différences, des équations aux dérivées partielles.....etc [15].

Les modèles dynamiques dérivés en ce mémoire se composent d'un ensemble de premier ordre équations (les premiers dérivés de signification seulement en ce qui concerne le temps). Une représentation d'un ensemble d'équations de premier ordre est :

II.2.6. Les modèles dynamiques

II.2.6.1. Forme générale

La forme générale d'un modèle dynamique est [1] :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, p_1, \dots, p_r) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, p_1, \dots, p_r) \\ &\cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, p_1, \dots, p_r) \end{aligned}$$

Où :

- x_i : Le variable d'état ;
- u_i : Le variable d'entrée ;
- p_i : paramètre.

La notation \dot{x} est utilisée pour représenter dx/dt .

Il est clair qu'on a n équations, n variable d'état, m entrées et r paramètres.

II.2.6.2. Les variables des modèles dynamiques**II.2.6.2.1. Variables d'état**

Une variable d'état est une variable qui surgit naturellement dans les termes d'accumulation d'un matériel dynamique ou d'un bilan énergétique. Une variable d'état est une quantité (au moins conceptuellement) qui indique l'état d'un système. Par exemple la température est la variable d'état commun qui résulte d'un bilan énergétique dynamique. Concentration est la variable d'état qui surgit quand les composants dynamiques équilibrés sont écrits [1].

II.2.6.2.2. Les variables d'entrée

La variable d'entrée est un variable qui doit être indiqué normalement avant qu'un problème puisse être résolu ou un processus peut être actionné. Les entrées sont normalement indiqué par un ingénieur basé sur la connaissance du processus étant considéré. Les variables d'entrée typiquement incluent les débits des jets entrant ou partant un processus (notez que le débit de la sortie (jet) pourrait être considéré une variable d'entrée). Compositions ou températures des jets entrant un processus sont aussi typiquement des variables d'entrée.

Les variables d'entrée sont souvent manœuvrés (par les contrôleurs de processus) afin de réaliser l'exécution désirée [1].

II.2.6.2.3. Les paramètres

Un paramètre est généralement une valeur d'une propriété physique ou chimique doit être indiqué ou connu pour résoudre un problème mathématiquement. Les paramètres sont souvent fixés par la nature, c.-à-d., la chimie de réaction, structure moléculaire, configuration, ou opération. Exemple : inclure la densité, viscosité, conductivité thermique, coefficient de transfert thermique.....etc [1].

II.2.7. L'utilisations des modèles dynamiques

Les modèles dynamiques permettent de traduire l'évolution temporelle des variables de sortie en fonction des variables d'entrée. Leur importance est évidente si l'on considère qu'un système complexe réel ne fonctionne que très peu en régime permanent [1].

L'emploi des modèles dynamiques de simulation est motivé par plusieurs classes essentielles de problèmes :

- Comment prévoir la réponse du procédé à différentes actions ou entrées possibles telles que des pannes, des changements de régime ou des manipulations d'actionneurs ?

- Comment agir sur les paramètres du système pour améliorer sa réponse, en termes de précision, de rapidité ou de sécurité ?
- Comment optimiser les phases de démarrage ou d'arrêt d'installation de façon à augmenter la qualité ou la productivité ?

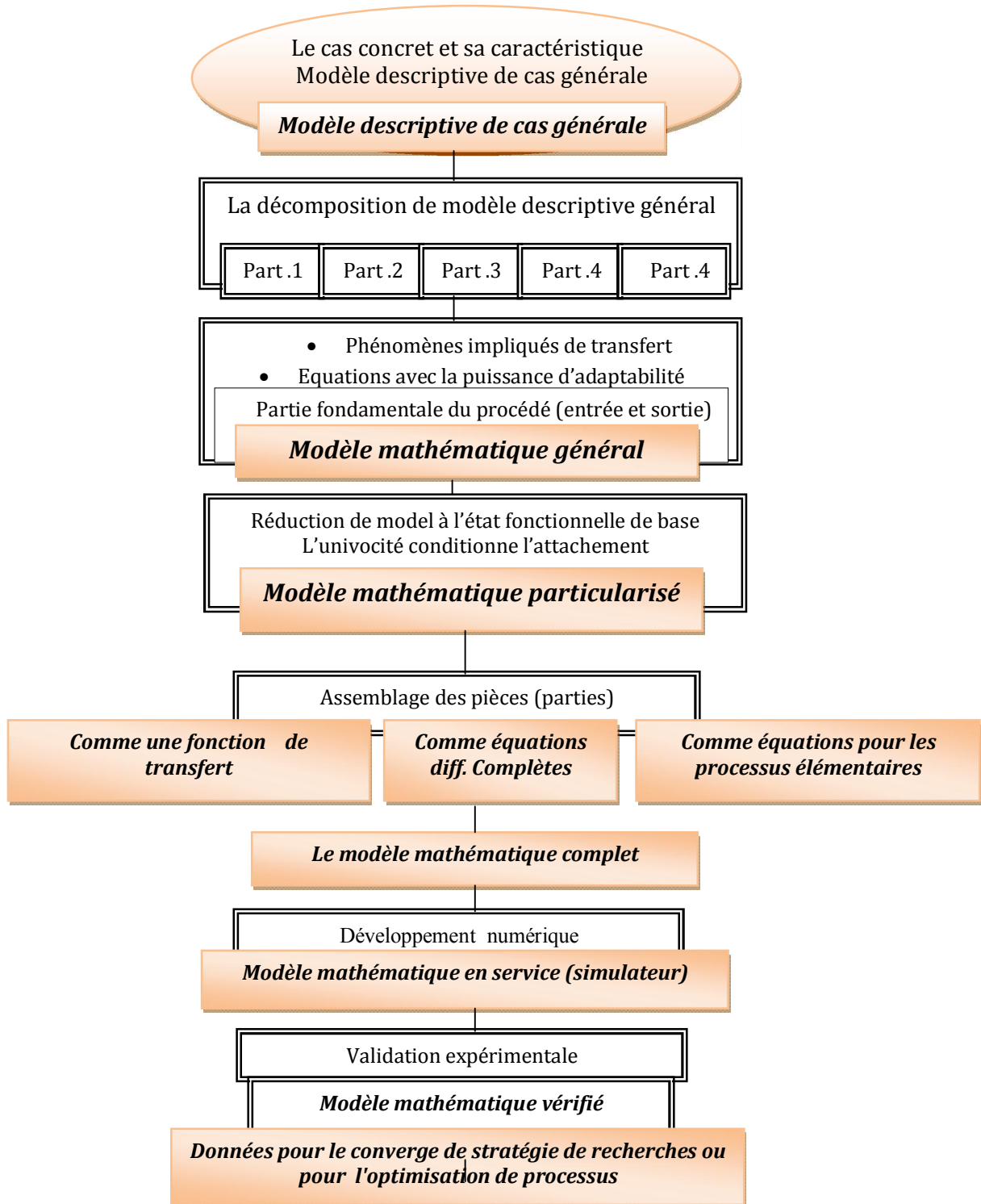


Figure II.1: Les étapes de la construction d'un modèle mathématique pour un cas concret [18]

II.2.8. L'étude des modèles dynamiques

L'étude complète d'un système dynamique linéaire composée de deux parties : temporelle et fréquentielle.

II.2.8.1. Etude temporelle

Dans cette étude nous nous intéresserons ici à identifier les réponses $y(t)$ des systèmes étudiés à des entrée $u(t)$ (basée sur la notion de représentation d'état).

II.2.8.1.1. Les modèles d'espace d'état

Toutes les méthodes étudiée jusqu'à présent, que ce soit pour les systèmes linéaire ou non, en temps continu ou discret restent valables et efficaces jusqu'à ce que ces systèmes atteignent une complexité telle que l'on ne puisse plus se satisfaire de l'unique relation entrée-sortie pour les commander correctement. De même, ces modèles deviennent difficiles à mettre en œuvre lorsque les systèmes étudiés possèdent plusieurs entrées et plusieurs sorties. La représentation d'état des systèmes est un outil puissant permettant de modéliser le fonctionnement de systèmes linéaires ou non, en temps continu ou en temps discret qui possède en outre, l'avantage de conserve la représentation temporelle des phénomènes [16].

Il s'agit de décrire la dynamique du système de manière interne à partir de l'évolution d'un vecteur d'état représentatif des grandeurs intervenant dans le système. Cette représentation se fait au travers d'une équation différentielle du premier ordre [20].

II.2.8.1.2. Forme général

Généralement, un modèle d'espace d'état a la forme suivante [1] :

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n + b_{11} u_1 + \dots + b_{1m} u_m \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \end{aligned}$$

$$\frac{dx_n}{dt} = a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + \dots + a_{nn} x_n + b_{n1} u_1 + \dots + b_{nm} u_m$$

$$\begin{aligned} y_1 &= c_{11} x_1 + c_{12} x_2 + \dots + c_{1n} x_n + d_{11} u_1 + \dots + d_{1m} u_m \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \end{aligned}$$

$$y_r = c_{r1} x_1 + c_{r2} x_2 + \dots + c_{rn} x_n + d_{r1} u_1 + \dots + d_{rm} u_m$$

Ce qui a :

n : variables d'état ;

m : variables d'entrée(u) ;

r : variables de sortie.

Ce rapport est normalement écrit sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdot & b_{1m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdot & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdot & c_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{r1} & c_{r2} & \cdot & c_{rn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdot & d_{1m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_{r1} & d_{r2} & \cdot & d_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix}$$

Ce qui a la forme générale (de l'espace d'état) :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t)$$

Où le point au-dessus du variable d'état ($\dot{\mathbf{x}}$) indique le dérivé avec le respect du temps. Le coefficient a_{ij} relie la variable d'état j au taux du changement de variable d'état i . pareillement, le coefficient b_{ij} relie l'entrée j au taux de changement de variable d'état i . aussi, c_{ij} relie l'état j au rendement (sortie) i , tandis que d_{ij} relie l'entrée j au sortie i [1].

A : matrice d'état, dynamique ou matrice d'évolution ;

B : matrice d'entrée ou de commande ;

C : matrice de sortie ou d'observation ;

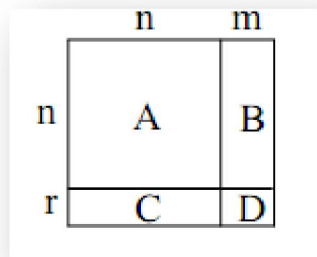
D : matrice de transmission direct ;

x : vecteur d'état ;

u : vecteur d'entrée ou de commande ;

y : vecteur de sortie ou d'observation.

Les coefficients de matrice doivent avoir ces caractéristiques, comme illustré dans le diagramme ci-dessous [21]:



- La matrice A doit être n-par-n, où n est le nombre d'états ;
- La matrice B doit être n-par-m, où m est le nombre d'entrées ;
- La matrice C doit être r-par-n, où r est le nombre de sorties ;
- La matrice D doit être r-par-m.

Lorsqu'un système est modélisé sous la forme d'une représentation d'état, on montre qu'il est possible d'exprimer l'état de système à un instant donné en fonction du signal d'entrée à ce même instant et en fonction de son « passé », autrement dit, de son état précédent. Comme nous avons affaire à des variables continues du temps, la notion d'état précédent n'existe pas vraiment. En revanche, ce concept à approcher de l'évolution du système, autrement dit des variations de chaque variable d'état [16].

II.2.8.1.3. Résolution des équations d'état

Résoudre les équations d'état consiste à déterminer l'expression du vecteur d'état $x(t)$ en fonction du temps, autrement dit à déterminer les expressions temporelles des n variables d'état, connaissant le système (c'est-à-dire connaissant [A],[B] et [C]) et connaissant l'entrée $u(t)$ qui lui appliquée [16].

II.2.8.1.3.1. Etude préalable

Si on avait affaire à un système décrit par une simple équation différentielle et non par un système différentiel, l'équation d'état résumerait à :

$$\dot{x} = ax + bu(t)$$

La solution d'une telle équation différentielle est connue et a pour expression :

$$x(t) = e^{at} x(0) + \int_0^t e^{a(t-\tau)} bu(\tau) d\tau$$

On reconnaît bien sûr dans cette expression la somme de la solution de l'équation correspondant au régime libre(ou autonome), soit $e^{at} x(0)$ et de la solution correspondant au régime forcé (ou commandé) [16].

II.2.8.1.3.2. Généralisation au système vectoriel

Considérons le système différentiel représentant les équations d'état :

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t)$$

On obtient, par généralisation du résultat précédent :

$$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau$$

Dans cette écriture, e^{At} représente une matrice exponentielle que l'on note en générale $\Phi(t)$ et que l'on appelle matrice de transition du système.

Si on connaît l'état du système à un instant t_1 différent de 0, on peut calculer son état à un instant t quelconque :

$$x(t) = e^{A(t-t_1)} x(t_1) + \int_{t_1}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau$$

On peut aussi résoudre les équations d'état en définissant une matrice de transfert multivariable [16].

II.2.8.1.3.3. Calcul de la matrice de transition

L'opération la plus délicate, dans la résolution des équations d'état consiste à calculer la matrice de transition. Il s'agit de représenter les relations existant entre les signaux d'entrée et de sortie du système, de nombreuses méthodes existent. Nous nous contenterons des présenter ici les plus classiques [16].

a) Utilisation de la transformation de Laplace

Appliquons la transformation de Laplace au système d'équations différentielles de la représentation d'état :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) &\Rightarrow sX(s) - x(0) = AX(s) + Bu(s) \\ \text{soit} & \quad (sI - A)X(s) = x(0) + Bu(s) \end{aligned}$$

Où :

I : représente la matrice carrée identité de dimension n ;

s : représente la variable de Laplace.

D'où:

$$X(s) = (sI - A)^{-1} x(0) + (sI - A)^{-1} Bu(s)$$

Il apparaît clairement, en confrontant cette expression à la solution générale déterminée dans le paragraphe précédent, soit :

$$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau$$

que la matrice de transition e^{At} possède pour transformé de Laplace la matrice $(sI - A)^{-1}$.

Transformons l'expression de $(sI - A)^{-1}$:

$$(sI - A)^{-1} = 1/s (I - A/s)^{-1} = (I/s + A/s^2 + A^2/s^3 + \dots + A^n/s^{n+1} + \dots)$$

On appliquant la transformation de Laplace inverse, on obtient:

$$e^{At} = (I + At + A^2/2! t^2 + \dots + A^n/n! t^n + \dots)$$

Cette expression ne surprendra personne puisqu'on y retrouve l'expression du développement de Taylor.

b) Application au calcul direct de la matrice de transition

On peut utiliser directement l'expression du développement de Taylor à condition que la matrice de commande soit nilpotente

c) Méthode de diagonalisation de la matrice de transition

Il est facile de remarquer que le calcul de la matrice de transition très simple à effectuer si celle-ci est diagonale.

En effet :

$$A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \Rightarrow e^{At} = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 t} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & e^{\lambda_n t} \end{bmatrix}$$

Cette constatation nous conduit naturellement à imaginer une méthode relativement facile pour calculer e^{At} : il suffit de diagonaliser la matrice A. considérons une matrice de commande quelconque :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Les vecteurs propres et les valeurs propres de cette matrice sont définis par :

$$A v_i = \lambda v_i$$

Si on appelle Δ la matrice diagonale formée des valeurs propres de la matrice A et T la matrice modale formée de ses vecteurs propres, on a :

$$\Delta = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \text{ et } T = [(v_1) \quad (v_2) \quad \dots \quad (v_n)]$$

Dans ces conditions :

$$A = T \Delta T^{-1}$$

Il est alors facile de vérifier que :

$$A^n = (T \Delta T^{-1}) \times (T \Delta T^{-1}) \times \dots \times (T \Delta T^{-1}) = (T \Delta^n T^{-1})$$

Comme:

$$e^{At} = (I + At + \frac{A^2}{2!} t^2 + \dots + \frac{A^n}{n!} t^n + \dots)$$

On a:

$$e^{At} = T (I + At + \frac{A^2}{2!} t^2 + \dots + \frac{A^n}{n!} t^n + \dots) T^{-1} = T \Delta^n T^{-1}$$

Par conséquent :

$$e^{At} = T \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2 t} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & e^{\lambda_n t} \end{bmatrix} T^{-1}$$

II.2.8.2. Etude fréquentielle

Cette étude est basée sur la notion de fonction de transfert (ou matrice de transfert, suivant la dimension de système).

II.2.8.2.1. Définition de la fonction de transfert

Il s'agit de représenter les relations existant entre les signaux d'entrée et de sortie du système à l'aide de leur transformée de Laplace. Si l'on dénote la variable de Laplace par s et les transformées de Laplace des signaux d'entrée $u(t)$ et de sortie $y(t)$ du système par $u(s)$ et $y(s)$ respectivement la représentation mathématique dans le domaine fréquentiel du système s'écrit [20]:

$$y(s) = G(s) u(s)$$

Autrement dit :

$$G(s) = \text{transformée da Laplace de la sortie } y(t) / \text{transformée da Laplace de l'entée } u(t)$$

Où $G(s)$ est la matrice de transfert .La matrice $G(s)$ est une matrice rationnelle, c'est-à-dire que ses composantes sont des fractions de polynômes en s . Notons que traditionnellement la notation s est réservée pour les systèmes à temps continu [20].

II.2.8.2.2. Calcul de la fonction de transfert à partir de la représentation d'état

Si on applique la transformation de Laplace aux équations d'état, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} s X(s) - x(0) = A X(s) + B u(s) \\ y(s) = C x(s) \end{cases}$$

On a donc : $s X(s) - A X(s) = x(0) + B u(s)$

Soit :

$$(sI - A)X(s) = x(0) + Bu(s)$$

Ou encore :

$$X(s) = (sI - A)^{-1} x(0) + (sI - A)^{-1} B u(s)$$

On tire alors l'expression d' $y(s)$:

$$y(s) = C x(s) = C(sI - A)^{-1}x(0) + C(sI - A)^{-1}B u(s)$$

La fonction de transfert est donc :

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1}B$$

II.3. ANALYSES DES SYSTEMES DYNAMIQUES

Les outils mathématiques qui sont utilisés pour étudier les problèmes des systèmes dynamiques linéaires sont connus par « techniques linéaires d'analyse ». Traditionnellement les techniques d'analyse des systèmes ont été basées sur la théorie de systèmes linéaires.

Deux approches de base sont typiquement utilisées :

- Les transformations de Laplace : sont utilisées pour analyser le comportement d'un simple, linéaire et n équations différentielles ;
- Les techniques d'espace d'état : (basées sur les techniques linéaires d'algèbre de l'analyse de valeurs et vecteurs propres) sont employées pour analyser le comportement des multiples équations linéaires différentielles ordinaires de premier ordre (comme il est indiqué dans les paragraphes précédents).

II.3. 1. Transformation de Laplace

II.3. 1.1. Utiles et principe

La transformation de Laplace est très utile dans l'analyse des systèmes linéaire dynamique (détermination de la fonction de transfert, déduire des réponses....), le but de la transformation de Laplace est de convertir des équations différentielles linéaires à des équations algébriques. Les équations algébriques sont beaucoup plus facile manœuvrer que les équations différentielles. Une analogie est l'utilisation des logarithmes pour changer l'opération de la manipulation avec cela de l'addition. Les transformations de Laplace soyez utiles pour résoudre les problèmes des systèmes dynamiques linéaires. En particulier les problèmes hétérogènes (quand l'entrée au système de processus est changée), et sont généralement employés dans la conception et l'analyse de système de contrôle du processus de cycle [1].

On peut résulter la suite :

1. Equation différentielle $\xrightarrow{\text{transf. Laplace}}$ équation algébrique ;
2. Résolution de l'équation algébrique ;
3. Solution de l'équation algébrique $\xrightarrow{\text{transf.inverse de Laplace}}$ solution de l'équation différentielle.

II.3. 1.2. Principe de transformation de Laplace

Considérez la fonction au domaine de temps $f(t)$. Le transformant de Laplace de $f(t)$ est présenté par $L[f(t)]$ et défini comme suit [1] :

$$L[f(t)] \equiv f(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

Cette opération transforme une variable du domaine de temps (t) au domaine de s (ou domaine de Laplace).

La transformation de Laplace est une opération linéaire :

$$\begin{aligned} L[a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)] &= \int_0^{\infty} a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) e^{-st} dt \\ &= \int_0^{\infty} a_1 f_1(t) e^{-st} dt + \int_0^{\infty} a_2 f_2(t) e^{-st} dt \\ &= a_1 \int_0^{\infty} f_1(t) e^{-st} dt + a_2 \int_0^{\infty} f_2(t) e^{-st} dt \\ L[a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)] &= a_1 L[f_1(t)] + a_2 L[f_2(t)] \end{aligned}$$

II.3. 2. Etude de stabilité des systèmes dynamique**II.3. 2.1. Définition de stabilité des systèmes**

La stabilité est la propriété fondamentale que doivent impérativement vérifier les systèmes décrits dans les paragraphes précédents (systèmes linéaires de premier ordre). Elle apparaît comme une condition primordiale d'efficacité des systèmes de commande. En effet, un industriel ne peut accepter qu'un processus quelconque fasse preuve d'instabilité lorsque certaines conditions de perturbation et/ou de consigne. D'une manière très qualitative et intuitive la stabilité d'un système est la capacité de ce dernier à revenir à sa position d'équilibre lorsqu'il en est ponctuellement écarté.

Un système est asymptotiquement stable si les pôles de sa fonction de transfert (les valeurs propres) sont à partie réelle < 0 [20].

II.3. 2.2. Les valeurs propres et les vecteurs propres

Les analyses de valeurs propres /vecteur propres sont importantes durant l'étude des systèmes dynamiques. Elles déterminent comment un système dynamique répond « rapide ou lent », et le vecteur propre associé indique la « direction » de la réponse.

Les analyses de valeurs propres /vecteur propres peuvent être seulement exécutées sur les matrices carrées [1].

Le problème de valeurs propres /vecteur propres est :

$$A v_i = \lambda v_i$$

A : matrice carrée (nombre de rangées = nombre de colonnes) ;

λ : valeur propre (scalaire) ;

v_i : vecteur propre (vecteur).

Il est clair qu'on a n valeurs propres et n vecteurs propres associé avec une matrice de dimension $n \times n$ [1].

II.3. 2.2.1. Les valeurs propres

Les valeurs propres d'une matrice A ($n \times n$) sont les n grandeurs scalaires de qui résolvent :

$$\det (\lambda I - A) = 0$$

Cette équation est aussi connue par le polynôme caractéristique du matrice A. Les valeurs propres sont les racines de polynôme caractéristique. Pour une matrice $n \times n$, le polynôme caractéristique soyez d'ordre n, donc il y a n racines (n valeurs propres).

II.3. 2.2.2. Les vecteurs propres

La correspondance n vecteurs propres (v_i) peut être trouvé de :

$$A v_i = \lambda_i v_i$$

v_i est le vecteur propre associé avec la valeur propre λ_i .

II.3. 3. Simulation de processus d'état- instable

II.3.3.1. Définition

L'état- instable ou la simulation dynamique explique les coupures de processus, d'un premier état à un état final. Les modèles dynamiques pour des processus chimiques complexes se composent typiquement de grands systèmes des équations ordinaires et des équations algébriques. Par conséquent, la simulation de processus dynamique est informatique intensive. Les simulateurs dynamiques contiennent typiquement trois unités [18] :

1. paquets de propriétés thermo- dynamiques et physiques ;
2. modèles d'opération d'unité ;
3. solutionneurs numériques.

II.3.3.2. Utilisation de simulation dynamique

La simulation dynamique est employée pour [17]:

- ✓ La conception et développement de traitement par lots ;
- ✓ développement de la stratégie de commande ;
- ✓ contrôle de système de commande ;
- ✓ l'optimisation des opérations d'usine ;
- ✓ études de processus de fiabilité / disponibilité / sûreté
- ✓ amélioration de processus, mise en train de processus et arrêt.

II.3.3.3. Avantages et inconvénients de la simulation

Comme toute approche scientifique, la simulation présente des avantages et des inconvénients [17] :

II.3.3.3.1. Avantages

- ✓ Permet de résolution de problèmes complexes;
- ✓ Simplicité et ne nécessite pas de fortes connaissances en théories mathématiques ou algorithmiques ;
- ✓ Plus flexible que la modélisation strictement mathématique ou formelle ;
- ✓ Permet d'exploiter les outils logiciels existants (logiciels mathématique ou de calcul formel, langage de simulation ;
- ✓ Permet de simuler rapidement (en quelques minutes sur ordinateur) un processus évoluant sur des mois ou des années.

II.3.3.3.2. Inconvénients

- ✓ Nécessite beaucoup de dépenses (en temps) pour la conception de modèle de simulation, la programmation, l'apprentissage ;
- ✓ Les résultats ne sont qu'approximatifs en raison des simplifications apportées au modèle ;
- ✓ Il faut consacrer beaucoup de temps à la modélisation, expérimentation et validation ;
- ✓ Absence d'universalité (dépend exclusivement du modèle).

II.3.3.4. Simulation avec MATLAB

La simulation des systèmes dynamique nécessite l'utilisation d'un langage de programmation le plus possible efficace (facile, peu chère, applicable...etc).

MATLAB est un acronyme pour « **MAT**rix **LAB**oratory ». Ce produit a été à l'origine développé en FORTRAN. Conçu à la base pour être un environnement de calcul scientifique et à la génération de graphisme (visualisation de données), c'est aujourd'hui un langage de programmation complet dans un environnement de développement simple et pratique [21].

CONCLUSION

D'une manière générale, les principaux problèmes posés par la mise en œuvre des systèmes physiques ou industriels concernent leur commande (régulation +contrôle), à savoir la détermination optimale des signaux d'entrée qu'il faut leur appliquer pour qu'ils se comportent de la manière souhaité. Les méthodes d'étude et d'analyse étudiées dans ce chapitre nous ont fournit l'approche méthodologique générale d'analyse des systèmes.

On peut résumer les étapes de cette opération par :

- Choix du modèle :
 - ✓ Détermination des équations du modèle ;
 - ✓ Nouvelles approches de modélisation ;
 - ✓ Réalisation....etc.

- Etude de modèle :
 - ✓ Exploration mathématique du modèle ;
 - ✓ Reformulation ;
 - ✓ Analyse numérique du modèle.

- Traitement de modèle :
 - ✓ Approche numérique ;
 - ✓ Implémentation ;
 - ✓ Simulation

CHAPITRE III***ETUDE DYNAMIQUE D'UNE COLONNE D'ABSORPTION*****III.1. INTRODUCTION**

L'absorption est une opération unitaire de génie des procédés caractérisée par le transfert de matière d'une phase à une autre. L'absorption est réalisée dans des divers types de réacteur (colonnes à garnissage, à plateaux, à bulles...). L'étude de la dynamique de ces réacteurs permet de trouver l'optimisation de leurs paramètres.

Dans ce chapitre on va étudier la dynamique d'une colonne d'absorption à cinq plateaux mis en œuvre à contre courant et essayer de suivre leur comportement temporel en utilisant un programme en MATLAB et l'outil graphique SIMULINK.

III .2. CARACTERISTIQUES D'UNE COLONNE D'ABSORPTION

Soit une colonne d'absorption à plateaux (voir figure) où circule à contre courant deux phases : liquide [pétrole lourd] et gaz [air + Benzène] :

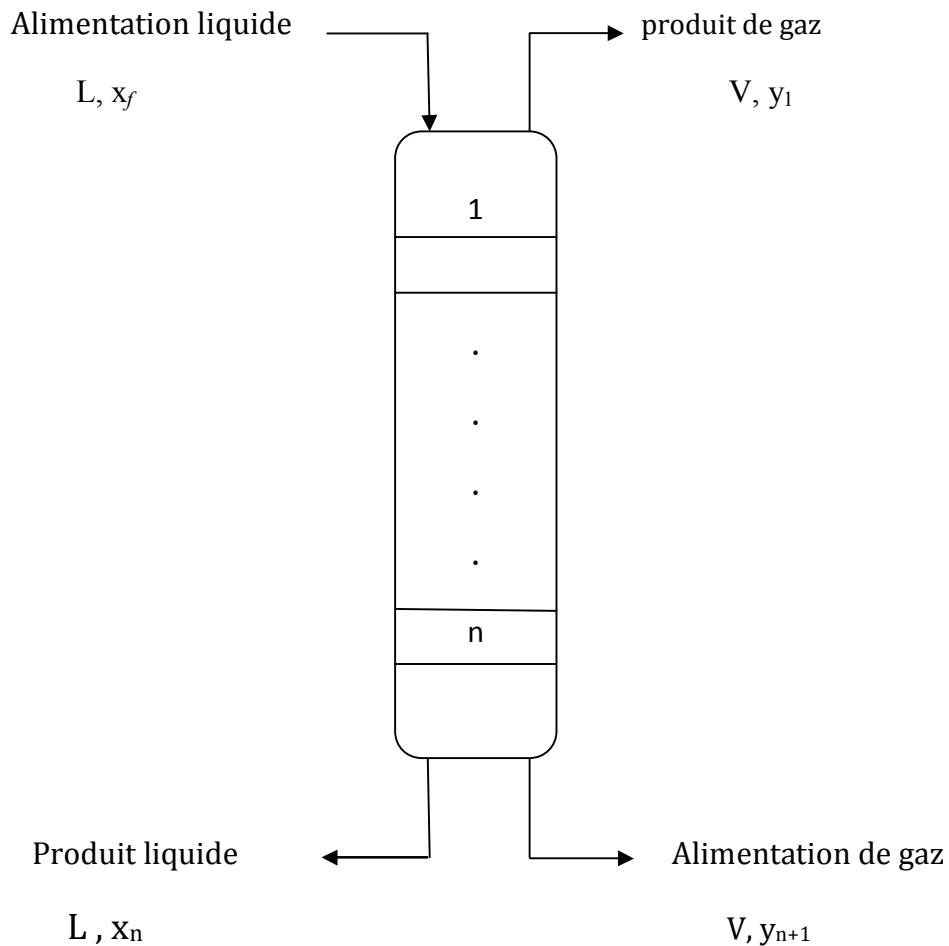


Figure III.1 : Colonne d'absorption à n étages.

Avec :

L : débit molaire liquide ;

V : débit molaire de vapeur ;

x_f : composition de liquide au niveau d'alimentation ;

x_n : composition de liquide au niveau de la sortie ;

y_1 : composition de vapeur au niveau d'alimentation ;

y_{n+1} : composition de vapeur au niveau de la sortie ;

(1): Sommet de la colonne d'absorption ; n : Bas de la colonne d'absorption.

III.3. PROCÉDE DE TRAITEMENT DE GAZ

Considérons la colonne d'absorption de gaz représentée sur la figure III.1. Les composants qui entrent par le bas de la colonne dont le flux d'alimentation en gaz sont absorbés par le flux de liquide, de sorte que le flux de gaz produit est plus "pur"; (sortant par le haut de la colonne). A titre d'exemple l'utilisation d'un flux de pétrole lourd (liquide) pour éliminer le benzène à partir d'un courant d'alimentation gazeux benzène /air. Les colonnes d'absorptions contiennent souvent des "plateaux" avec une couche de liquide s'écoulant à travers le plateau, ces plateaux sont souvent modélisés comme des étapes d'équilibre.

III.4. EXEMPLE DE PROCÉDE ET PROBLEMATIQUE

Laissez le débit liquide d'alimentation $L = 80$ kgmol d'huile inerte / h, débit d'alimentation en vapeur $V = 100$ kgmol d'air / h, le paramètre d'équilibre $\alpha = 0,5$, la composition des aliments liquides $x_f = 0,0$ kgmol benzène / kgmol huile inerte, et la composition d'alimentation en vapeur $y_6 = 0,1$ kgmol de benzène / kgmol d'air. Laissez fonctionner avec des unités de minutes, ainsi $L = 4 / 3$ kgmol d'huile inerte / min et $V = 5 / 3$ kgmol d'air / min. supposer que la rétention de liquide molaire pour chaque étape (phase) est $M = 20 / 3$ kgmol.

Dans ce qui se suit on s'intéresse de :

- La modélisation d'une colonne d'absorption ;
- Comprendre le comportement de réponse des colonnes d'absorption ;
- Utiliser la fonction de MATLAB 'step' pour des simulations d'espace d'état et aussi l'outil MATLAB 'SIMULINK' pour l'étude dynamique;
- Utiliser les analyses de valeur propre /vecteur propre pour comprendre le comportement de système non forcé (étudier la stabilité de système) ;
- Déterminer la fonction de transfert qui relie notre entrée et sortie (qui justifié la réponse de système).

III.5.LE MODELE DYNAMIQUE

Pour développer un modèle dynamique de notre système il faut tout d'abord dicter quelques hypothèses simplificatrices :

III.5.1. Hypothèses de base

- Nous supposons que la composante majeure du flux liquide est "inerte" et ne s'absorbe pas dans le flux de gaz ;
- Nous supposons également que la principal composante du flux de gaz est "inerte" et ne s'absorbe pas dans le flux de liquide ;
- On suppose que chaque étape du processus (chaque plateau) est une phase d'équilibre ;
- la vapeur sortante de la scène est en équilibre thermodynamique avec le liquide à ce stade.

III.5.2. Définition des variables

Nous utilisons les définitions de variables suivantes:

L = (débit molaire liquide) moles de liquide inerte / heure ;

V = (débit molaire de vapeur) moles de vapeur inerte / heure ;

M = (rétention molaire liquide par étage) moles de liquide / phase ;

W = (rétention molaire de vapeur par étage) moles de vapeur / phase ;

X_i = moles de soluté (phase i) / moles de liquide inerte (stade i) ;

Y_i = moles de soluté (phase i) / moles de vapeur inerte (stade i).

III.5.3. Stade d'équilibre

Le concept d'une phase d'équilibre est important pour le développement d'un modèle dynamique de la colonne d'absorption. Un stade d'équilibre est représenté schématiquement dans la figure III.2.

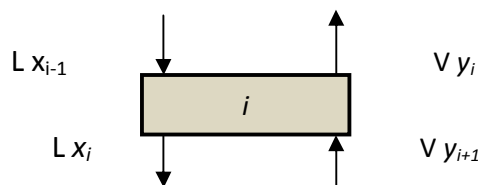


Figure III.2 : Une étape typique d'absorption de gaz.

III.5.4. Equilibre des solutés dans la phase i

Le débit total de soluté dans la phase « i » est la somme du soluté dans la phase liquide et la phase gazeuse ; c'est-à-d ($Mx_i + Wy_i$), Le taux de variation de la quantité du soluté est alors $\frac{d(Mx_i + Wy_i)}{dt}$.

Le bilan de matières calculé autour du plateau (i) peut maintenant être écrit comme suit :

$$\text{Accumulation} = \text{Entrée} - \text{Sortie}$$

$$\frac{d(Mx_i + Wy_i)}{dt} = Lx_{i-1} + Vy_{i+1} - Lx_i - Vy_i \tag{III. 1}$$

Comme le liquide est beaucoup plus dense que la vapeur, on peut supposer que la contribution majeure durant l'accumulation est le terme (Mx_i). L'équation (1) peut maintenant être écrite :

$$\frac{d(Mx_i)}{dt} = Lx_{i-1} + Vy_{i+1} - Lx_i - Vy_i \tag{III. 2}$$

- Suite à cette hypothèse le taux de rétention de liquide molaire (M) est constant, alors on peut écrire (2) comme :

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{L}{M} x_{i-1} + \frac{V}{M} y_{i+1} - x_i - \frac{V}{M} y_i \tag{III. 3}$$

La solution à ce problème sera plus facile si nous pouvons développer une relation explicite entre la composition en phase vapeur et la composition en phase liquide. Nous supposons que la vapeur sur chaque plateau est en équilibre avec le liquide.

III.5.5. Equilibre de phases

La plus simple relation est une relation d'équilibre linéaire et elle s'écrit comme suit :

$$y_i = \alpha x_i \tag{III. 4}$$

Cette relation est décrite en détail dans le chapitre I

III.5.6. L'équation de modélisation pour l'étage i

La substitution de la relation (4) dans le bilan de matières (3), nous donne :

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{L}{M} x_{i-1} + \frac{V}{M} x_{i+1} - \frac{L}{M} x_i - \frac{V}{M} y_i \quad (\text{III. 5})$$

Qui peut être écrite sous la forme suivante:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{L}{M} x_{i-1} - \frac{(L+V_\alpha)}{M} x_i + \frac{V_\alpha}{M} x_{i+1} \quad (\text{III. 6})$$

Il convient de noter que (6) donnera une matrice avec une structure tridiagonale.

III.5.7. Etage supérieur:

En appliquant l'équilibre dans l'étage supérieur (étage 1), on obtient :

$$\frac{dx_n}{dt} = -\frac{(L+V_\alpha)}{M} x_1 + \frac{V_\alpha}{M} x_2 + \frac{L}{M} x_f \quad (\text{III.7})$$

Où x_f est connu (la composition en alimentation liquide).

III.5.8. Etage inférieur

L'équilibre autour de l'étage inférieur (stage n), nous donne :

$$\frac{dx_n}{dt} = \frac{L}{M} x_{n-1} - \frac{(L+V_\alpha)}{M} x_n + \frac{V}{M} y_{n+1} \quad (\text{III. 8})$$

Avec :

y_{n+1} est connue (composition de l'alimentation de vapeur).

III.5.9. Exemple d'une colonne d'absorption à cinq étages

Les équations de modélisation (III.6) - (III.8) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{(L+V_\alpha)}{M} x_1 + \frac{V_\alpha}{M} x_2 + \frac{L}{M} x_f \quad (\text{étage 1})$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{L}{M} x_1 - \frac{(L+V_\alpha)}{M} x_2 + \frac{V_\alpha}{M} x_3 \quad (\text{étage 2})$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{L}{M} x_2 - \frac{(L+V_\alpha)}{M} x_3 + \frac{V_\alpha}{M} x_4 \quad (\text{étage 3})$$

$$\frac{dx_4}{dt} = \frac{L}{M} x_3 - \frac{(L+V_\alpha)}{M} x_4 + \frac{V_\alpha}{M} x_5 \quad (\text{étage 4})$$

$$\frac{dx_5}{dt} = \frac{L}{M} x_4 - \frac{(L+V_\alpha)}{M} x_5 + \frac{V}{M} y_6 \quad (\text{étage 5})$$

Les variables d'état sont x_i ($i = 1$ à 5) et les variables d'entrée sont x_f (composition de l'alimentation liquide), y_6 (composition de l'alimentation de vapeur). Il est supposé que les débits liquide et vapeur sont constants.

Ces équations peuvent être écrites sous la forme d'une matrice tridiagonale.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(L + V_\alpha)}{M} & \frac{V_\alpha}{M} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{L}{M} & -\frac{(L + V_\alpha)}{M} & \frac{V_\alpha}{M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{M} & -\frac{(L + V_\alpha)}{M} & \frac{V_\alpha}{M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{M} & -\frac{(L + V_\alpha)}{M} & \frac{V_\alpha}{M} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L}{M} & -\frac{(L + V_\alpha)}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{V}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ x_6 \end{bmatrix}$$

Qui ont la forme d'équation d'espace d'état :

$$\dot{x} = A x + B u \tag{III. 10}$$

III.6. ANALYSE DE L'ETAT D'EQUILIBRE

Nous avons montré que la forme des équations de la dynamique de la colonne d'absorption peut se mettre sous forme d'équation d'espace d'état, équation (III.10).

À l'équilibre le terme d'accumulation est nul et donc :

$$0 = A x + B u \tag{III. 11}$$

Les valeurs de x à l'équilibre peuvent être déduites à partir de la relation (III.11) comme suit:

$$x = - A^{-1} B u$$

III.7. APPLICATION

Paramètres pour le cinquième étage de la colonne d'absorption :

On donne le débit liquide d'alimentation $L = 80$ kgmol d'huile inerte / h, débit d'alimentation en vapeur $V = 100$ kgmol d'air / h, le paramètre d'équilibre $\alpha = 0,5$, la composition d'alimentation liquides $x_f = 0,0$ kgmol benzène / kgmol huile inerte, et la composition d'alimentation en vapeur $y_6 = 0,1$ kgmol de benzène / kgmol d'air. Laissant fonctionner pendant des minutes, ainsi $L = 4 / 3$ kgmol d'huile inerte / min et $V = 5 / 3$ kgmol d'air / min. On suppose que la rétention molaire du liquide pour chaque phase est $M = 20 / 3$ kgmol.

Les valeurs numériques sont rapportées dans les matrices suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} -0.325 & 0.125 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & -0.325 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & -0.325 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & -0.325 & 0.125 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & -0.325 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.25 \end{bmatrix}$$

L'entrée de l'état d'équilibre est :

$$u = \begin{bmatrix} x_f \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

La résolution de x à l'état stationnaire, nous donne :

$$x_s = - A^{-1}Bu_s$$

Donc :

$$x_s = \begin{bmatrix} 0.0076 \\ 0.0198 \\ 0.0392 \\ 0.0704 \\ 0.1204 \end{bmatrix}$$

Qui est simplement un vecteur de la composition de la phase liquide. La composition du produit liquide (sortant de l'étage 5) est $x_5 = 0,1202$.

La composition de la quantité de vapeur produite (sortante de l'étage 1) est obtenue à partir de la relation d'équilibre linéaire ($y_i = \alpha x_i$) $y_1 = 0.5x_1 = 0,5 (0,0076) = 0,0038$ kgmol de benzène / kgmol d'air.

III.8. ANALYSE DE L'ETAT DYNAMIQUE

Pour étudier la dynamique de notre colonne d'absorption on doit appliquer des perturbations aux compositions de ses entrées au niveau des alimentations liquide et gaz, et essayer de justifier les réponses de ces plateaux en déterminant la fonction de transfert de notre système.

III.8.1. Application de programme 'MATLAB'

On applique le programme MATLAB décrit dans l'annexe A pour établir les résultats de notre système.

III.8.1.1. Réponses en échelon

Ici, nous allons utiliser la fonction MATLAB 'step' pour trouver les réponses à un changement radical dans la composition des alimentations. La fonction 'step' exige un modèle linéaire d'espace d'état sous forme de variables en déviations.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u$$

III.8.1.2. Perturbation de la composition au niveau de l'alimentation vapeur

A l'instant $t = 5$ minutes, la composition du jet de vapeur entrant dans la colonne change de $y_6 = 0,1$ kgmol de benzène / kg mol d'air à $Y_6 = 0,15$ kgmol de benzène / kg mol d'air. On utilise la fonction MATLAB 'step' pour trouver comment les compositions de liquide et de vapeur d'eau (x_6 et y_1) quittent la colonne en fonction du temps.

Comment sont faites les réponses transitoires pour l'ensemble des compositions de la phase liquide (de x_1 à x_5) et en quoi diffèrent-ils?

La fonction 'step' est utilisée pour résoudre les équations suivantes :

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta u$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta u$$

Où :

$\Delta \mathbf{y}$: est le vecteur de sortie (sous forme d'écart (déviation)).

Pour ce problème, nous considérons x_5 (composition du liquide sortant du bas de la colonne) et y_1 (composition du flux de vapeur sortante de la tête de la colonne) comme des sorties.

$$\Delta \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta x_5 \\ \Delta y_1 \end{bmatrix}$$

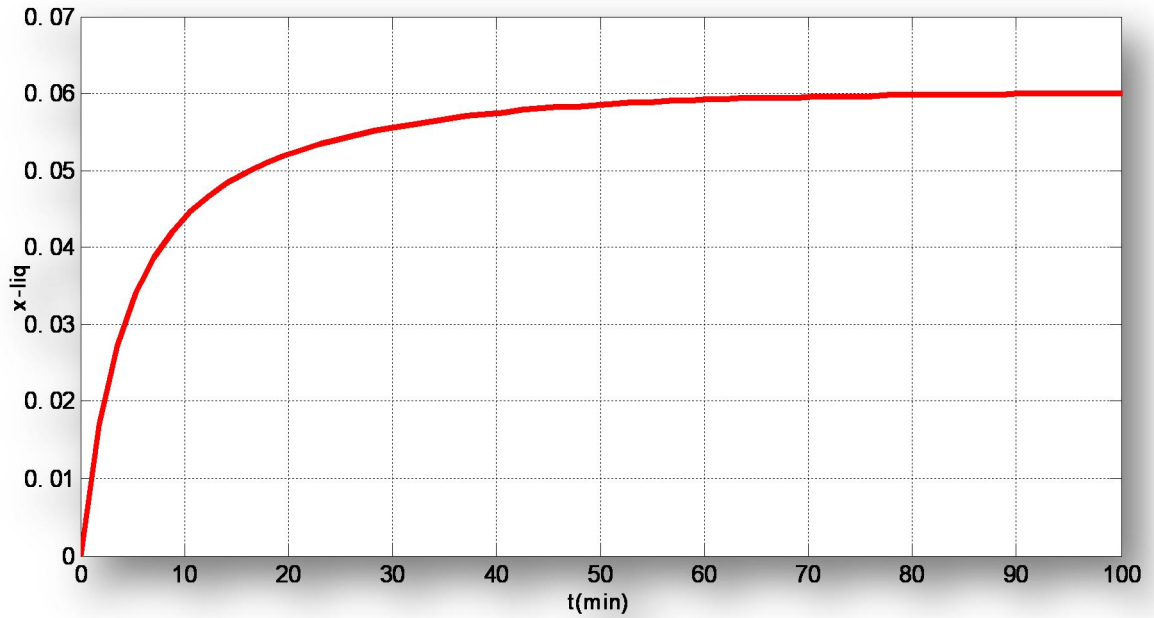
Par conséquent, les matrices C et D sont :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[y, x, t] = step (A, B, C, D, 2)

Où le 2 dans la dernière colonne indique que la deuxième entrée c'est elle qui est en cours de changement :

L'application de cette fonction nous donne les résultats affichés ci dessous.



F

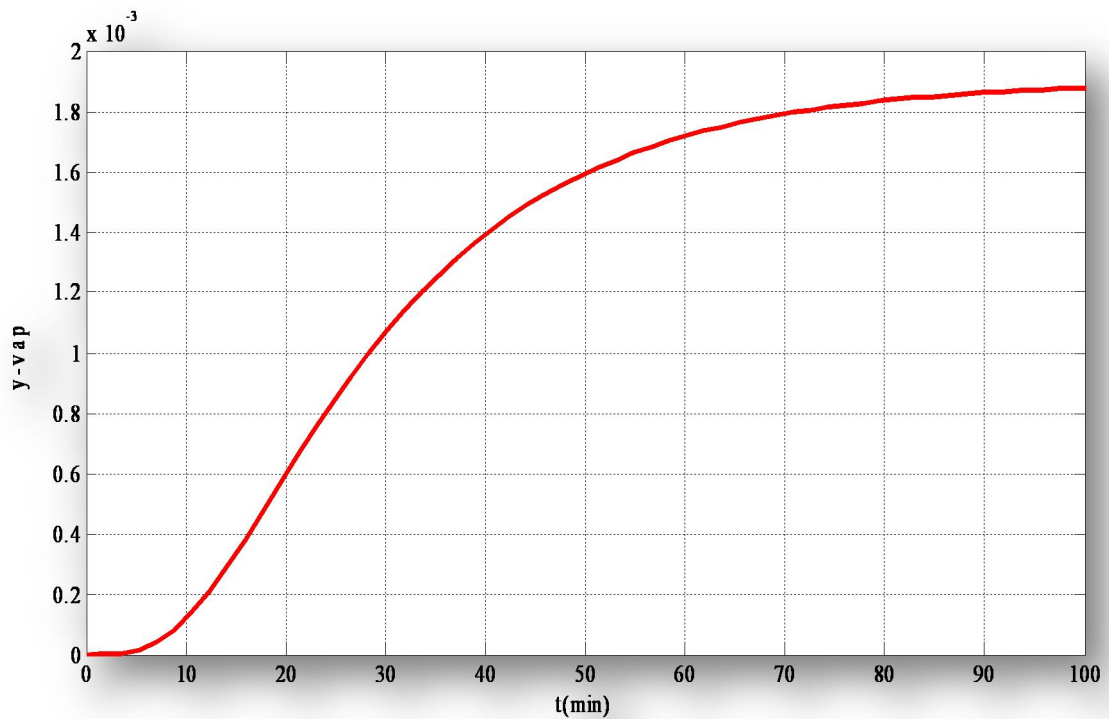


FIGURE III .4 : Réponse de la composition du plateau supérieur à une augmentation échelon de 0,05 au niveau de l'alimentation vapeur, à l'instant $t = 0$.

Une comparaison entre les figures III.3 et III.4 montre que la composition de vapeur dans l'étage inférieur (x_6) répond plus rapidement aux changements de l'alimentation vapeur que la composition de l'étage supérieure (y_1). Cela fait sens physique, parce que la perturbation doit se propager en six étages (du bas vers le haut de la colonne) pour affecter la composition supérieure.

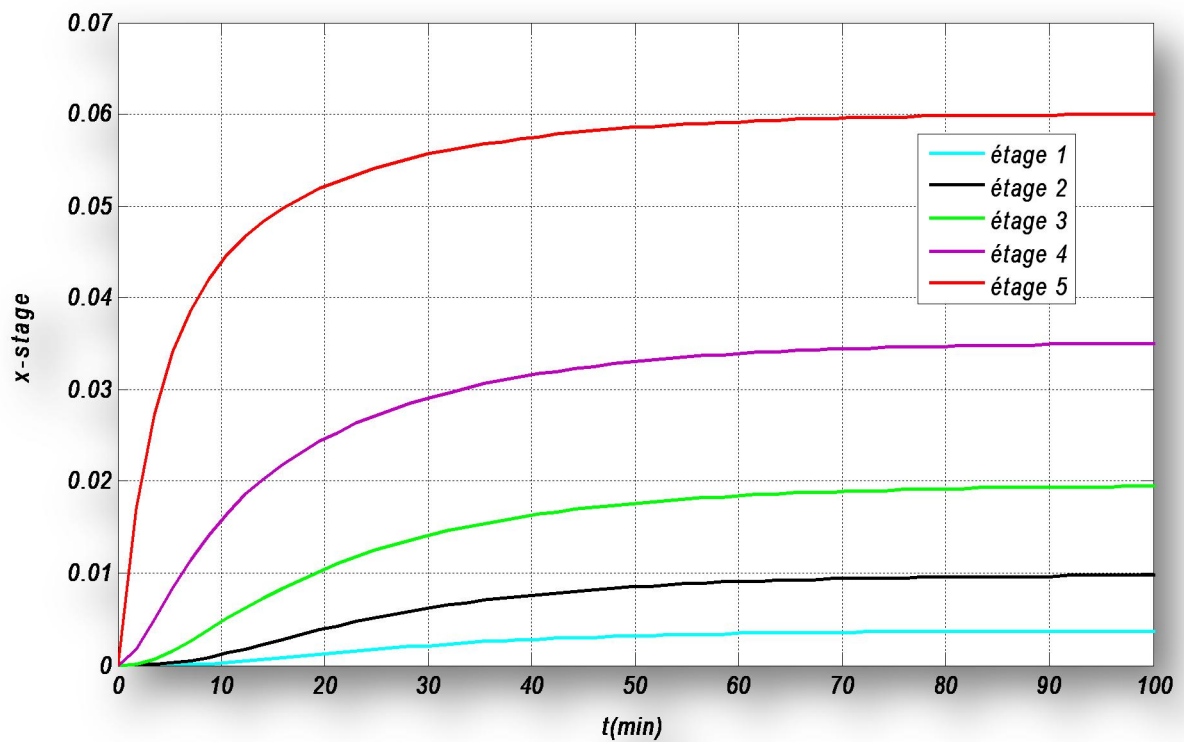


Figure III.5 : Réponses de la composition d'étages à un avancement d'échelon de 0,05 de l'alimentation de vapeur, à l'instant $t = 0$.

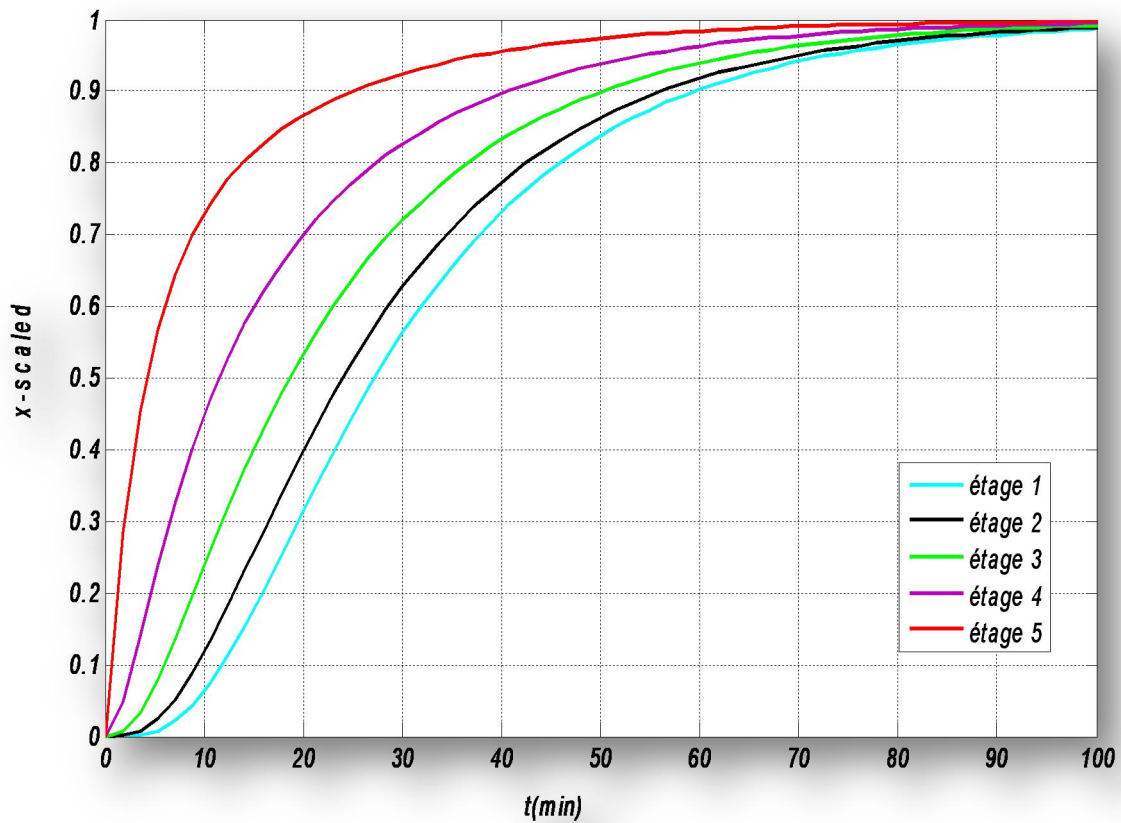


Figure III.6 : Réponse de la composition normalisée des étages à une augmentation échelon de 0,05 au niveau de l'alimentation vapeur, à l'instant $t = 0$.

La figure III.5 montre que l'ampleur du changement de la composition des étages est plus forte sur les plateaux en bas. La déviation des variables $(x_i(t) - x_i(0))$ a été utilisée pour faciliter la comparaison.

Le rapport "vitesse de réponse" montre que la réponse est plus rapide d'autant qu'on s'approche du bas de la colonne, comme le montre la figure III.6.

La déviation des variables $(x_i(t) - x_i(0)) / (x_i(t = 100) - x_i(0))$ a été utilisée pour faciliter la comparaison.

III.8.1. 3. Perturbation de la composition au niveau de l'alimentation liquide

A l'instant $t = 0$, la composition du flux du liquide entrant dans la colonne change de $x_f = 0,0$ kgmol de benzène / kgmol d'huile inerte à $x_f = 0,025$ kgmol de benzène / kgmol d'huile inerte. On utilise la fonction MATLAB 'step' pour trouver comment les compositions de liquide et de la vapeur d'eau (x_5 et y_1) quittent la colonne en fonction du temps.

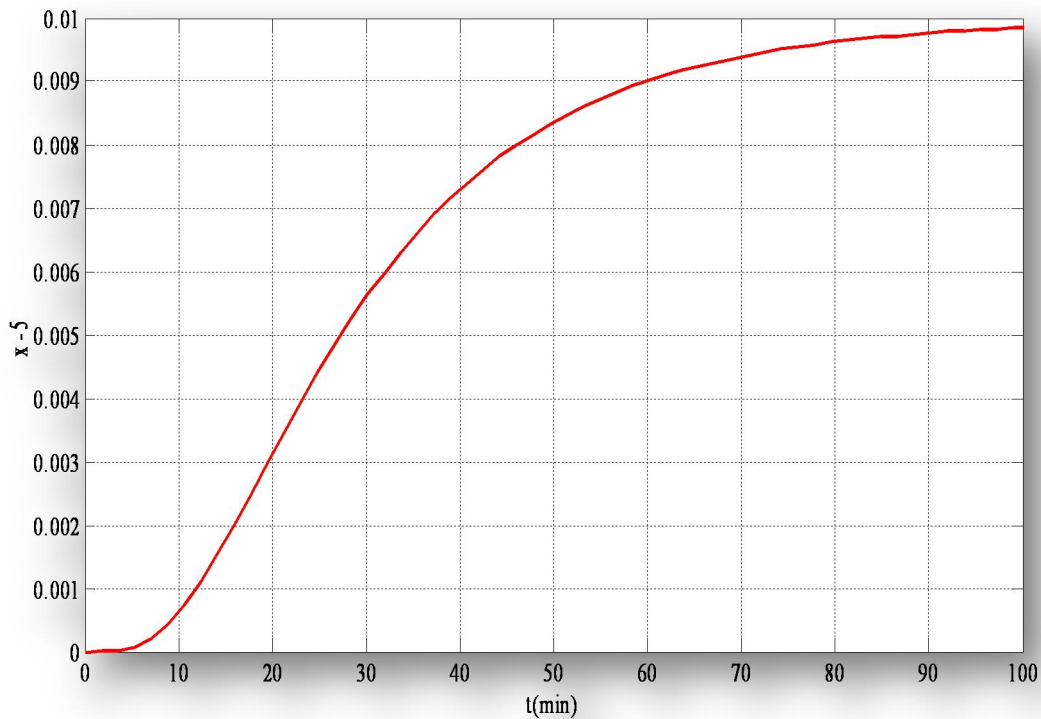


Figure III.7 : Réponse de la composition du plateau inférieur à une augmentation échelon de 0,025 au niveau de l'alimentation liquide, à l'instant $t = 0$.

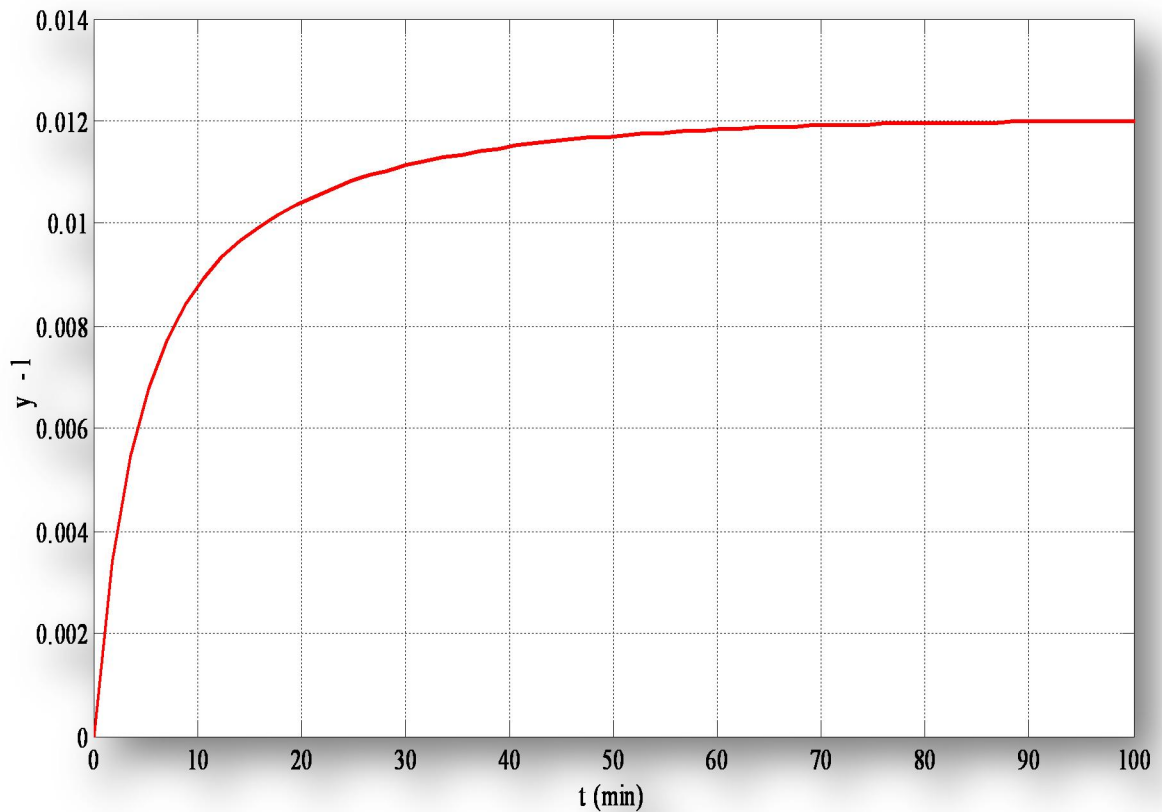


Figure III.8 : Réponse de la composition du plateau supérieur à une augmentation échelon de 0,025 au niveau de l'alimentation liquide, à l'instant $t = 0$.

Une comparaison de figures III.7 et III.8 montre que la composition d'étage inférieur (x_5) réagit plus lentement au changement d'alimentation en liquide que la composition d'étage supérieure (y_1). Cela a un sens physique, parce que la perturbation doit se propager à travers six étapes (du haut vers le bas de la colonne) pour affecter la composition du fond.

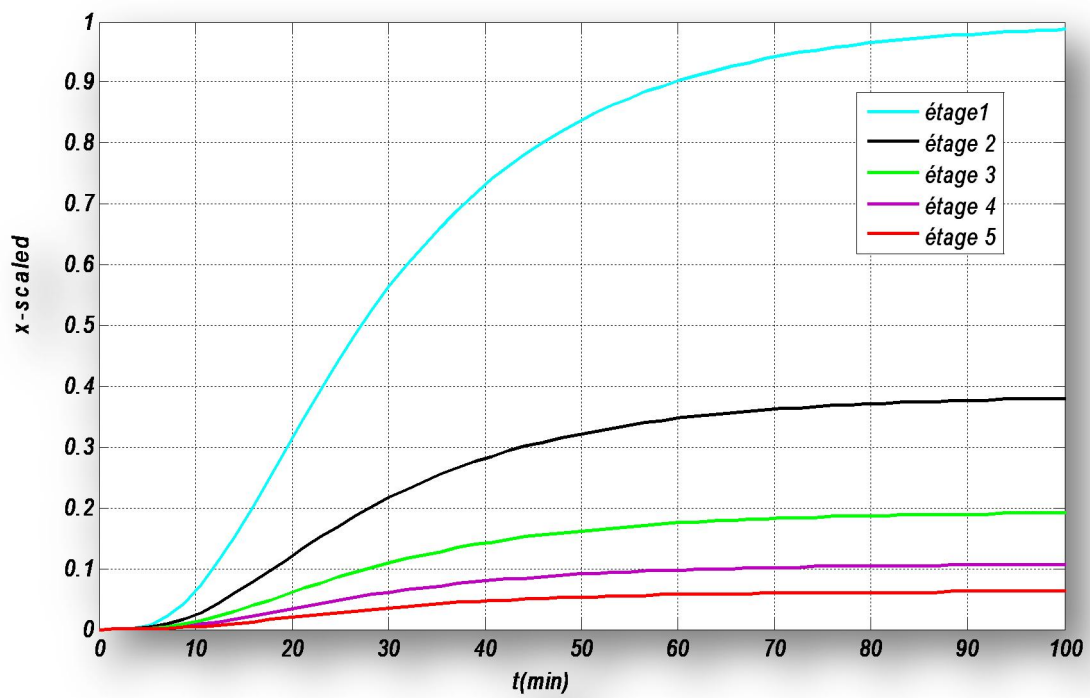
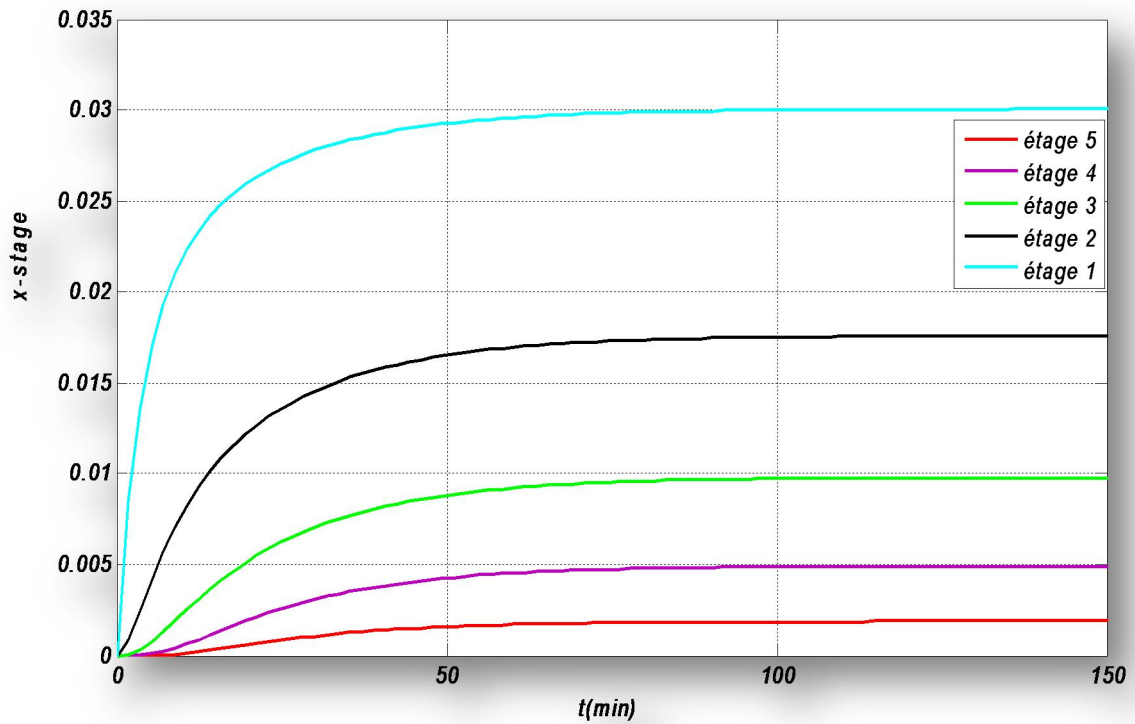


Figure III.10 : Réponse de la composition normalisée des étages à une augmentation échelon au niveau de 0,025 d'alimentation liquides à $t = 0$.

CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée n'est que préliminaire et partielle car elle touche uniquement un des nombreux cotés de cette étude qui est liée à plusieurs facteurs dépendants et complexes.

Au cours de ce travail, nous avons fixé comme objectif l'étude dynamique d'une colonne d'absorption (modélisation et simulation). L'application a été faite sur une colonne d'absorption à cinq plateaux. Cette colonne est conçue pour purifier ou récupérer certains composants contenant dans un flux de vapeur par un flux de liquide.

Pour la partie théorique nous avons donné les principales détails de tous qui concerne notre étude : l'absorption comme phénomène et comme procédé chimique industrielle (les colonnes d'absorption types et applications), puis nous avons détaillé les étapes de notre étude dynamique (modélisation, analyse et simulation).

Pour la partie pratique l'étude dynamique ne conduit à la résolution d'un grand nombre d'équations algébriques linéaires et d'équations algèbro-différentielles est réalisable avec MATLAB. Ceci a permis de faire la simulation statique et aussi dynamique de la colonne.

La fonction de transfert a été utilisée afin de réaliser la commande de la colonne. Pour l'étude de la dynamique de la colonne d'absorption, l'outil graphique SIMULINK (MATLAB 7.0.7) a été employé et qui a donné des résultats très satisfaisants.

Vu les contraintes de temps et de moyens ; il nous a pas été permis de traiter le sujet avec plus de détails, mais nous pensons à la lumière de ce thème une fois améliorer et perfectionné pourra être adopté facilement au domaine de génie chimique. Notre recommandation est d'établir les études dynamiques pour des colonnes d'absorption multi-étage ou pour d'autres types de colonnes à fin d'améliorer et développer les systèmes de régulation et commande (contrôle).

ANNEXE A

```
% absorb-ex.m
% aeq = gas/liquid equil coeff
% ns = number of stages
% xfeed = liquid feed composition
% yfeed = vapor feed composition
% liq = liquid molar flowrate
% vap = vapor molar flowrate
% mhold = liquid molar holdup per stage
% set parameters
ns = 5;
liq = 80/60;
vap = 100/60;
mhold = 20/3;
xfeed = 0;
yfeed = 0.1;
aeq = 0.5;
amat = zeros(ns,ns);
bmat = zeros(ns,2);
% calcul ratios
lvratio = -(liq+vap*aeq)/mhold;
lratio = liq/mhold;
vratio = vap*aeq/mhold;
amat(1,1)= lvratio;
amat(1,2)= vratio;
%
for i= 2:ns-1;
    amat (i,i-1) = lratio;
```



```
amat (i,i) = lvratio;
amat (i,i+1) = vratio;
end
amat (ns,ns-1) = lratio;
amat (ns,ns) = lvratio;
bmat(1,1) = lratio;
bmat(ns,2)= vap/mhold;
% calculate the steady-state
xs = -inv(amat)*bmat*[xfeed;yfeed]
amat
bmat
xs
% perform step tests using step
% step change the vapor feed composition at t = 0
cmat = zeros(2,ns);
cmat(1,ns) = 1;
cmat(2,1) = aeq;
dmat = zeros(2,2);
[y,x,t] = step(amat,bmat,cmat,dmat,2);
% actual step magnitude was 0.05
y
x
y = y*0.05
x = x*0.05
% plot the liquid composition leaving the absorber (deviation
variables)
plot (t,y(:,1),'r')
xlabel ('t(min)')
ylabel ('x-liq')
pause
%on leaving the absorber
plot (t,y(:,2),'r')
```

```
xlabel ('t(min)')
ylabel ('y-vap')
% break
pause
% plot each stage liquid composition (deviation)
plot(t,x,'r')
xlabel('t(min)')
ylabel('x-stage')
% break
pause
% plot each stage, normalized by the final change
nt = length(t);
for i = 1:ns;
    xscale(:,i)=x(:,i)/x(nt,i);
end
plot(t,xscale,'r')
xlabel('t(min)')
ylabel('x-scaled')
pause
% now, do a step change in liquid feed composition
[y1,x1,t1] = step(amat,bmat,cmat,dmat,2);
% actual input change was 0.05
y1 = y1*0.025;
x1 = x1*0.025;
% plot the liquid composition leaving the absorber (deviation
variables)
plot(t1,y1(:,1),'r')
xlabel('t(min)')
ylabel('x-5')
pause
% plot the vapor composition leaving the absorber
plot (t1,y1(:,2))
```

```
pause
% plot each stage liquid composition (deviation)
plot(t1,x1,'r')
xlabel('t(min)')
ylabel('x-stage')
pause
% plot scaled liquid composition
nt1 = length(t1);
for i = 1:ns;
    xscale1(:,i) = x1(:,1)/x1(nt1,i);
end
plot(t1,xscale1,'r')
xlabel('t(min)')
ylabel('x-scaled')
```

ANNEXE B

```
s=tf('s')
a=[-0.325 0.125 0 0 0;0.2 -0.325 0.125 0 0;0 0.2 -0.325 0.125
0;0 0 0.2 -0.325 0.125; 0 0 0 0.2 -0.325]
b=[0.2 0;0 0;0 0;0 0;0 0.25]
c=[0 0 0 0 1;0.5 0 0 0 0]
d=[0 0;0 0]
[num,den]=ss2tf(a,b,c,d,2)
num =[0      0.2500      0.3250      0.1397      0.0221      0.0010]

den= [ 1.0000      1.6250      0.9563      0.2458      0.0260
0.0008]
h=tf(num,den)
zpk(h)
step(h)
ginput(1)
```

ANNEXE C

```
%% Master Chimie%%
%*****
% extraction du temps t et des 4 signaux x5, y1, xf et y6

t=mesures(:,1);% représente le temps
x5=mesures(:,2);% C'est une sortie: elle représente la
composition du liquide sortant du bas de la colonne
y1=mesures(:,3);% C'est une sortie: elle représente la
composition du flux de vapeur sortant de la tete de la colonne
xf=mesures(:,4);% C'est une entrée: elle représente la
composition d alimentation en liquide
y6=mesures(:,5);% C'est une entrée: elle représente la
composition d alimentation en vapeur
% Affichage sur un ecran form d'un colonne de 4 graphiques
figure(1)
subplot(311), plot(t,xf,'r') % 'r': signifie que la couleur de
la courbe soit en rouge
axis([0 100 0 .04]);
xlabel('t [minute]')
ylabel('CAL x_f')
title('Mesures')
subplot(312), plot(t,y6,'k')%'k': signifie que la couleur de
la courbe soit en noir
xlabel('t [minute]')
ylabel('CAV y_6')
subplot(313), plot(t,x5,'b'); hold on;'b': signifie que la
couleur de la courbe soit en bleu
%subplot(314)
plot(t,y1,'g'); %'g': signifie que la couleur de la
courbe soit en vert
xlabel('t [minute]')
ylabel('x_5 et y_1=0.5.x_1')
```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Wayne Bequette. "Process dynamic ' modeling, analysis and simulation' ". New Jersey.1998.
- [2] Sylve TISSOT, Annick PICHARD, " Seuil de Toxicité Aiguë Hydrogène Sulfuré (H₂SO₄) ", Direction des Risques chimiques (DRC), unité d'Expertise Toxicologique de substances chimiques (ETSC), janvier 2000.
- [3] AMRANI Salah, thèse de Magister, " détermination de l'aire interfaciale d'une colonne d'absorption du CO₂ par une solution de monoéthanolamine (MEA) ", Ecole Nationale supérieure Polytechnique (ENP), Alger. 2009.
- [4] Robert H.Perry, don W. green "Perry's chemical engineers,' handbook"; 8^{ème} édition, ED. McGRAW-HILL, New-york.1984.
- [5] WWW.INERSI.com
- [6] HAROUN Yacine, thèse de Doctorat, "Etude du transfert de masse réactif Gaz-liquide le long de plans corrugués par simulation numérique avec suivie interface", Institut National Polytechnique de Toulouse. 2008.
- [7] J.R. WELTY; C.E. WICKS; R.E. WILSON. "Fundamentals of Momentum, Heat and mass transfer".1987.
- [8] DABLIZ Ammar. Thèse de doctorat, "Etude d'un réacteur (contacteur) gaz-liquide à jet vertical immergé en vue de son application dans le traitement des eaux usées". Institut national des sciences appliquées de Lyon. 2000.
- [9] P.V. DANCKWERTS, Gas-Liquid Reaction, McGraw-Hill, New York.1970.
- [10] Ataki A., "Wetting of Structured Packing Elements – CFD and Experiment. Université de Kaiserslautern .2006.
- [11] Cicile J.C, Distillation, Absorption. Colonnes à plateaux : Dimensionnement, Techniques de l'Ingénieur, J 2 623
- [12] Cicile J.C., Distillation, Absorption. Colonnes à plateaux : Technologie, Techniques de l'ingénieur, J 2 622
- [13] N. Ayrault, "Etat de l'art sur les colonnes d'abattage – rapport intermédiaire d'opération – Programme DRA39 – Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs ", INERIS – MEDD – 2004.
- [14] Joseph Lieto, "Le génie chimique à l'usage des chimistes". 2^{ème} édition. Paris.2004.

[15] EL JAI Abdelhaq, “Eléments d’analyse et de contrôle des systèmes “1^{ère} édition. France.2004.

[16] Yves Granjon. “Automatique “, 2^{ème} édition. Paris.2003.

[17] AISSANI Ammar, “ Modélisation et simulation “, 2^{ème} édition. Alger. 2007.

[18] Tanase G. Dobe et José G.Sanchez Macrano. “Chemical engineering ‘modeling, simulation and similitude’ “, 2^{ème} édition. Germany.2007.

[19] HENRION Didier, thèse de Doctorat. “ Stabilité des systèmes linéaires incertaines à commande contrainte “, institut national des sciences appliquées de toulouse.1999.

[20] www.mathwork.com.

(Simulink, 'dynamis système simulation for MATLAB.' Version3).

[21] Jean- Thierry LAPRESTE, “Introduction à MATLAB “,3^{ème} édition.Paris.2009.

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, nous avons développé un modèle dynamique linéaire pour une colonne d'absorption et nous avons utilisé la fonction MATLAB 'step' pour étudier l'effet perturbations dans la composition d'entrée (alimentation). L'ampleur du changement de la composition était la plus grande sur les plateaux les plus proches de l'entrée où il a eu le changement progressif. Le temps de réponse a été plus significatif sur les étages les plus proches du lieu de la perturbation. Par exemple, pour une perturbation échelon au niveau de la composition d'alimentation de la vapeur qui entre dans le bas de la colonne, l'effet était plus grand (magnitude plus grande et temps de réponse plus rapide) sur les plateaux inférieurs de la colonne.

Mots clés : modèle linéaire, perturbation, réponses de la colonne.

ABSTRACT

In this memory we developed a dynamic linear model for an absorption column and used the MATLAB step function to study the effect of input composition changes. The magnitude of composition change was greatest on the stages closest to the step input change. And the "speed" of composition change was faster on the stages closest to the step disturbance. For example, for a step change in the vapor feed composition (which enters the bottom of the column) the effect was greatest (magnitude largest and speed fastest) on the compositions of the stages close to the bottom of the column.

Key-words: linear model, step change, response of the column.