

M0016/04A

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de génie chimique

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de magister

Présenté par : M^{lle} SEDDARI SOUMIA

Thème

*Simulation d'une colonne à garnissage
d'absorption du CO₂ par une solution aqueuse
de monoethanolamine à 25 °C et à 40 °C*

Devant le jury :

Pr. C.E. CHITOUR

Professeur

Président

M^{me} R. DERRICHE

Maître de conférence

Examinatrice

Mr T. AHMED ZAID

Maître de conférence

Examineur

Mr E.H. BENYOUSSEF

Maître de conférence

Examineur

Mr A. SELATNIA

Maître de conférence

Rapporteur

M^{me} S. HADDOUM

Chargé de cours

Rapporteuse

2004

ENP – 10 Avenue Hacén Badi – El Harrach – Alger

Dédicace

*Je dédie ce mémoire à ma très chère mère et mon très cher père en
témoignage à leurs dévouements sans limites, leurs
sacrifices et le confort moral et psychologique qu'ils m'ont assuré le long
de mes années d'études.*

A mes sœurs : Karima et Amel.

A mes frères : Bounouar, Mohamed et Hamza.

A tous les gens que j'aime.

« Soumia »



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

REMERCIEMENTS

Louage à Dieu le tout puissant qui par grâce m'a permis d'en arriver à tracer les derniers mots de ce mémoire.

Par ailleurs, je tiens à remercier vivement et du fond de cœur Monsieur A.Selatnia et M^{me} S.Haddoum qui ont proposé et ont bien voulu diriger cette recherche.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur C.E.Chitour qui a bien voulu accepter de présider le jury de soutenance de cette thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements aux autres membres de jury qui ont accepté d'évaluer mon présent travail :

<i>M^{me} R. DERRICHE</i>	<i>Maître de conférence</i>	<i>Examinatrice</i>
<i>Mr T. AHMED ZAID</i>	<i>Maître de conférence</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr E.H.BENYOUSSEF</i>	<i>Maître de conférence</i>	<i>Examineur</i>

Finalement, je remercie toute personne qui a contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail.

ملخص

تمثيل عمود محشو لامتصاص ثاني أكسيد الكربون بواسطة محلول المونوايثانول أمين في درجة حرارة 25° و 40°.

العمل المقدم يخص تمثيل عمود محشو لامتصاص ثاني أكسيد الكربون بواسطة محلول المونوايثانول أمين في درجة حرارة 25° و 40°.

في إطار هذه الدراسة قمنا بإتجاز نموذج رياضي يمكننا من حساب تركيز ثاني أكسيد الكربون و كذا تركيز المونوايثانول أمين المتبقين بعد الامتصاص بواسطة تفاعل كيميائي.

للتأكد من نجاعة النموذج قمنا بدراسة تجريبية على العمود في درجة حرارة 25° و 40° و النتائج المحصل عليها كانت ايجابية بالمقارنة مع النتائج النظرية.

كلمات المفتاح امتصاص، عمود، المونوايثانول أمين، ثاني أكسيد الكربون، انتشار، تصنيع، تمثيل.

Résumé

Simulation d'une colonne à garnissage d'absorption du CO₂ par une solution aqueuse de monoethanolamine (MEA) à 25 °C et à 40 °C.

Le présent travail concerne la simulation d'une colonne à garnissage d'absorption du CO₂ par une solution aqueuse de monoethanolamine (MEA) à 25 °C et à 40 °C.

L'étude réalisée consiste à établir un modèle mathématique permettant d'estimer les concentrations du CO₂ et de la MEA en sortie de la colonne à garnissage dont les dimensions sont connues.

Pour s'assurer de la validité du modèle proposé, nous avons effectué des essais expérimentaux sur la colonne à garnissage à 25 °C et à 40 °C. Les résultats obtenus à partir du modèle sont en accord avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Absorption, Colonne, Monoethanolamine, CO₂, Diffusion, Modélisation, Simulation.

Abstract

Simulation at 25 ° C and 40 ° C of absorption packed column used for CO₂ absorption by an aqueous solution of monethanolamine (MEA).

The present work describe the simulation at 25 ° C and 40 ° C of absorption packed column used for CO₂ absorption by an aqueous solution of monethanolamine (MEA).

This study consist in establishing a mathematical model used to calculate the CO₂ and MEA concentrations at the packed column outlets.

The validity of this model is checked by some experiments on the packed column at 25 °C and 40 °C. The small difference between the values of CO₂ and MEA concentrations at the column outlet obtained by experimental and by model, showed the validity of the model predictions.

Key words: Absorption, column, Monoethanolamine, CO₂, Diffusion, Modélisation, Simulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION :	1
Chapitre I : Transfert de matière sans réaction chimique.	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Le concept d'équilibre.....	4
I.3. Théorie du double film de Lewis et Whitman.....	6
I.4. Coefficients partiels de transfert de matière.....	7
I.5. Coefficients globaux de transfert de matière.....	9
I.6. Relation entre les coefficients de transfert de matière globaux et partiels.....	9
I.7. Estimation de k_G , k_L et a	11
I.8. Calcul de la hauteur de la colonne d'absorption.....	12
Chapitre II : Transfert de matière avec réaction chimique.	
II.1. Principe.....	20
II.2. Bilan de matière en phase liquide.....	22
II.3. Expressions de C_A et des densités de flux en phase liquide.....	24
II.3.1. Cas d'une réaction de pseudo – premier ordre.....	24
II.3.2. Cas d'une réaction de deuxième ordre.....	28
II.3.3. Expression de Kishinevskii.....	30
II.3.4. Réaction instantanée.....	31
Chapitre III : Modélisation et simulation de la colonne d'absorption.	
III.1. Cinétique de la réaction entre le CO_2 et la MEA.....	36
III.2. Modélisation de la colonne d'absorption.....	36
III.3. Procédure de simulation de la colonne d'absorption.....	43
1. Calcul du coefficient d'accélération E.....	44
2. Algorithme du programme principal.....	45

Chapitre V : Partie expérimentale

IV.1. Description et fonctionnement de la colonne d'absorption.....	51
IV.2. Méthode d'analyse de la MEA.....	54
IV.3. Expression de calcul de la concentration expérimentale du CO ₂ en sortie de la colonne d'absorption.....	54
IV.4. Caractéristiques de la colonne à garnissage.....	55
IV.4.1. Surface spécifique du grain.....	56
IV.4.2. Fraction du vide d'un grain.....	56
IV.4.3. Diamètre équivalent du grain.....	57
IV.4.4. Porosité de la colonne à garnissage.....	57
IV.4.5. Aire géométrique du garnissage.....	58
IV.5. Les résultats expérimentaux.....	58
IV.5.1. Résultats obtenus à partir du dispositif pilote.....	58
IV.5.2. Interprétation des résultats.....	64
IV.6. Discussion des résultats obtenus expérimentalement et par simulation.....	65
IV.7. CONCLUSION.....	67

Annexes

Bibliographie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction

I. Introduction :

L'absorption d'un gaz dans un liquide se rencontre dans de nombreux procédés des industries chimiques, agroalimentaires, pétrolières et biochimiques. Le paramètre clef intervenant dans la mise au point de ces procédés ainsi que dans le dimensionnement des réacteurs est la solubilité des différents gaz dans les différents liquides et leurs capacités à réagir avec des réactifs dissous dans ces liquides.

Les colonnes d'absorption à garnissage restent les plus utilisées pour la séparation des gaz acides tels que : le CO_2 , le H_2S du gaz naturel et autres gaz industriels, parce qu'elles présentent une grande aire interfaciale.

Toutes substances présentant une réactivité avec le CO_2 pourraient être utilisées pour séparer le CO_2 d'un mélange gazeux. Pour des raisons économiques, les réactifs les plus appropriés sont les alkaloamines (les amines primaires, secondaires, tertiaires).

De ce fait, dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés à l'étude expérimentale et à la modélisation de l'absorption du CO_2 par la solution aqueuse de monoéthanolamine (MEA) dans une colonne à garnissage opérant à deux températures : $25\text{ }^\circ\text{C}$ et $40\text{ }^\circ\text{C}$.

Le modèle mathématique proposé permet d'estimer les concentrations du CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne d'absorption. Un programme permettant la résolution des équations différentielles a été réalisé.

Dans une première partie, nous avons étudié expérimentalement l'influence des différents paramètres à savoir les concentrations de la MEA, du CO_2 à l'entrée de la colonne d'absorption et la température sur les capacités d'absorption des solutions aqueuses de monoéthanolamines.

Dans la seconde partie de ce travail, une comparaison entre les concentrations du CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne d'absorption obtenues expérimentalement et à partir du modèle a été faite.

Chapitre I

Transfert de matière sans réaction chimique

Nomenclature du chapitre

- a** : Aire interfaciale (m^2/m^3 de lit)
A_p : Surface spécifique du garnissage gaz - liquide (m^2/m^3 de lit)
C_{AL} : Concentration du composé A dans la phase liquide (mole/m^3)
C_{ALi} : Concentration du composé A à l'interface gaz - liquide (mole/m^3)
C_{AL}* : Concentration du composé A en équilibre avec P_{AG} ($\text{mole de A}/\text{m}^3$)
C_{AL1}*, **C_{AL2}*** : Concentrations du composé A dans la phase liquide en équilibre avec P_{AG1}, P_{AG2} respectivement en (mole/m^3)
C_{AG1}, **C_{AG2}** : Concentrations du composé A dans la phase gazeuse en bas et au sommet de la colonne ($\text{mole de A}/\text{m}^3$)
C_{ALI}, **C_{AL2}** : Concentrations du composé A dans la phase liquide en bas et au sommet de la colonne ($\text{mole de A}/\text{m}^3$)
D_{AG} : Coefficient de diffusion du composé A côté gaz (m^2/s)
D_{AL} : Coefficient de diffusion du composé A côté liquide (m^2/s)
D_p : Dimension caractéristique du garnissage (m)
dz : Élément d'une hauteur de la colonne (m)
g : Accélération gravitationnelle (m/s^2)
G : Débit volumique du mélange gazeux par unité de section droite de la colonne ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$)
G_s : Débit molaire de l'inerte par unité de section droite de la colonne ($\text{mole d'inerte}/\text{m}^2.\text{s}$)
H : Constante de Henry ($\text{atm}.\text{m}^3/\text{mole}$)
k_G : Coefficient de transfert de matière partiel côté gaz (m/s)
K_G : Coefficient de transfert de matière global côté gaz ($\text{mole de A}/\text{m}^2.\text{s}.\text{atm}$)
k_L : Coefficient de transfert de matière partiel côté liquide (m/s)
K_L : Coefficient de transfert de matière global côté liquide (m/s).
K_X : Coefficient de transfert de matière relatif au rapport molaire X_A ($\text{mol d'air}/\text{m}^2.\text{s}$)
K_Y : Coefficient de transfert de matière relatif au rapport molaire Y_A ($\text{mol d'air}/\text{m}^2.\text{s}$)
L : Débit volumique du mélange liquide par unité de section droite de la colonne ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$)
L_s : Débit molaire de l'eau par unité de section droite de la colonne ($\text{mole d'eau}/\text{m}^2.\text{s}$)

- N_A : Densité du flux du composé A transféré (mole de A/m². s)
 N_{AG} : Densité du flux du composé A transféré dans la phase gazeuse (mole de A/m². s)
 N_{AL} : Flux du composé A transféré dans la phase liquide (mole de A transféré/m².s)
 P_{AG} : Pression partielle du composé A dans la phase gazeuse (atm)
 P_{AG}^* : Pression partielle du composé A qui est en équilibre avec C_{AL} (atm)
 P_{AG1}, P_{AG2} : Pressions partielles du composé A dans le mélange gazeux en bas et au sommet de la colonne (atm)
 P_{AGi} : Pression partielle du composé A à l'interface gaz - liquide (atm)
 R : Constante des gaz parfaits (l.atm /mole.K)
 S : Section droite de la colonne (m²)
 T : Température (K)
 V_{SG} : Vitesse superficielle du mélange gazeux (m/s)
 V_{SL} : Vitesse superficielle du mélange liquide (m/s)
 X_A : Rapport molaire du composé A (mole de A/mole d'eau)
 X_{A1}, X_{A2} : Rapport molaire du composé A en phase liquide en bas de colonne et en haut de la colonne (mole de A/mole d'eau)
 X_A^* : Rapport molaire du composé A en phase liquide à l'équilibre (mole de A/mole d'eau)
 Y_A : Rapport molaire du composé A en phase gazeuse (mole de A/mole d'air)
 Y_{A1}, Y_{A2} : Rapport molaire du composé A en bas de colonne et en haut de colonne (mole de A/mole d'air)
 Y_A^* : Rapport molaire du composé A en phase gazeuse à l'équilibre (mole de A/mole d'air)
 Z : Hauteur de la colonne garnissage (m)
 μ_G : Viscosité dynamique du mélange gazeux (kg/m.s)
 μ_L : Viscosité dynamique du mélange liquide (kg/m.s)
 ρ_G : Masse volumique du mélange gazeux (kg/m³)
 ρ_L : Masse volumique du mélange liquide (kg/m³)
 δ_G : Epaisseur du film côté phase gazeuse (m)
 δ_L : Epaisseur du film côté phase liquide (m)
 σ : Tension superficielle relative à la phase liquide (N/m)
 σ_C : Tension superficielle critique relative au matériau du garnissage (N/m)

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposerons la théorie du transfert de matière sans réaction chimique dans une seule phase ainsi que le transfert de matière entre deux phases en contact. Ces derniers peuvent être un gaz en contact avec un liquide ou simplement deux liquides immiscibles. Nous considérons le régime de transfert de matière entre les deux phases comme étant permanent.

I.2. Le concept d'équilibre [1]

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. En effet, on peut trouver de nombreux exemples de situations dans lesquelles une substance est transférée d'une phase où elle est en plus faible concentration à une phase où elle est en plus forte concentration, 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.

Donc, dans le cas d'un système hétérogène (C'est à dire deux phases immiscible 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.

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.

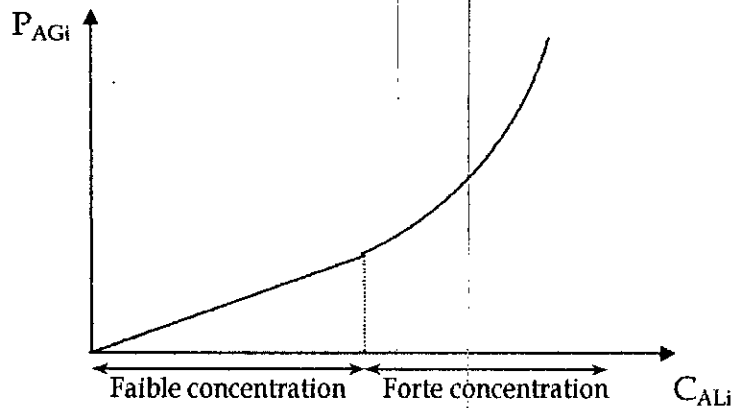


Figure I.1. La distribution d'un soluté A à l'équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide à une température donnée.

avec :

C_{ALi} : Concentration du composé A dans la phase liquide et à l'interface gaz – liquide (mol/m^3).

P_{AGi} : Pression partielle du composé A dans la phase gazeuse et à l'interface gaz – liquide (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).

La loi de Henry étant : $P_{AGi} = H \cdot C_{ALi}$ (I.1)

Où :

H : La constante de Henry

C_{ALi} : Etant la concentration à l'équilibre dans la phase liquide du composé A et à l'interface gaz – liquide (mol/m^3).

P_{AGi} : Etant la pression partielle à l'équilibre dans la phase gazeuse du composé A et à l'interface gaz – liquide (atm).

I.3. Théorie du double film de Lewis et Whitman

Lewis et Whitman [1] ont admis au niveau du contact d'un liquide avec les gaz l'existence d'un film stagnant d'une certaine épaisseur dans chaque phase. On suppose qu'au voisinage de l'interface l'écoulement est laminaire alors qu'il est turbulent au-delà. De même, la composition au sein du liquide est maintenue constante par agitation turbulente. On considère qu'il n'y a pas de convection dans le film, le gaz dissous étant transporté exclusivement par diffusion moléculaire.

A l'interface il n'y a aucune résistance au passage d'une phase à l'autre et les concentrations du soluté en phase gazeuse et en phase liquide sont en équilibre c'est à dire les concentrations P_{AGi} et C_{ALi} sont les coordonnées d'un point de la courbe d'équilibre.

Le profil de concentration de l'espèce transférée est linéaire à l'intérieur du film aussi bien du côté gaz que du côté liquide. Ce modèle est représenté sur la figure I.2.

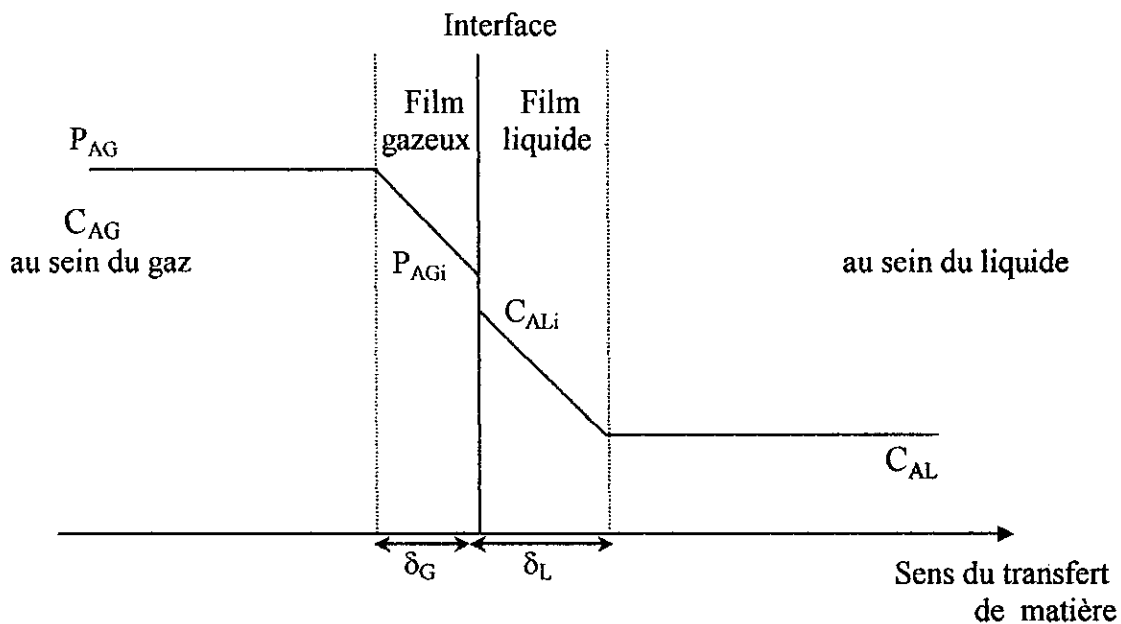


Figure I.2. Profils des concentrations selon le modèle de Lewis et Whitman.

I.4. Coefficients partiels de transfert de matière [1]

Pour caractériser le transfert de matière dans une phase, on définit un coefficient partiel ou local de transfert de matière k_L en phase liquide ou k_G en phase gazeuse, en rapportant le flux transféré à une force motrice caractéristique qui peut être, selon le coefficient de transfert de matière, un gradient de concentration ou de pression :

Côté liquide :

$$N_{AL} = k_L (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (I.2)$$

Avec :

N_{AL} : Flux du composé A transféré dans la phase liquide (mole de A /m².s).

k_L : Coefficient de transfert de matière partiel côté liquide (m /s).

C_{ALi} , C_{AL} : Concentration du composé A à l'interface et dans la phase liquide respectivement (mole de A/m³).

Côté gaz :

$$N_{AG} = k'_G . (P_{AG} - P_{AGi}) \quad (I.3)$$

Avec :

N_{AG} : Flux du composé A transféré dans la phase gazeuse (mole/m².s)
 [(mole de A transféré) / (unité d'aire interfaciale. unité de temps.)].

k'_G : Coefficient de transfert de matière partiel côté gaz
 (mole de A transféré/m².s.atm)

P_{AG} : Pression partielle de A dans la phase gazeuse (atm)

P_{AGi} : Pression partielle de A à l'interface (atm)

Si à l'interface il y a équilibre, on peut écrire

$$P_{AGi} = H . C_{ALi} \quad (I.4)$$

Où :

P_{AGi} : Pression partielle du composé A à l'interface côté gaz (atm)

H : Constante de Henry (atm.m³/mol)

C_{ALi} : Concentration du composé A à l'interface côté liquide (mol/ m³)

Les coefficients de transfert de matière partiels sont définis comme étant :

$$k_G = D_{AG} / \delta_G \quad ; \quad k_L = D_{AL} / \delta_L \quad (I.5)$$

Avec :

k_G, k_L : Coefficients de transfert de matière partiels respectivement du côté gaz et côté liquide (m/s)

D_{AG}, D_{AL} : Coefficients de diffusion du composé A respectivement du côté gaz et côté liquide (m²/s)

δ_G, δ_L : Epaisseurs du film respectivement du côté gaz et côté liquide (m).

On considère que le flux de matière transféré côté gaz et côté liquide est le même, on peut écrire en régime permanent:

$$N_{AL} = N_{AG} = k'_G (P_{AG} - P_{AGi}) = k_L (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (I.6)$$

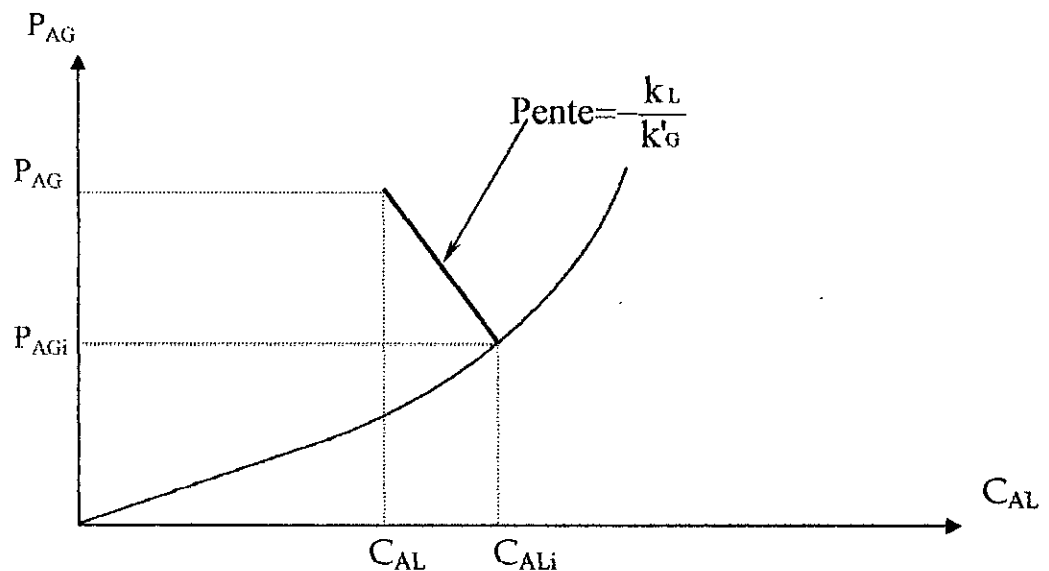


Figure I.3. Prédiction des compositions interfaciales par la théorie du double film.

I.5. Coefficients globaux de transfert de matière [1]

On peut définir les flux de matière en fonction des coefficients globaux de transfert de matière :

$$\begin{cases} N_{AG} = K'_G (P_{AG} - P_{AG}^*) & (I.7) \\ N_{AL} = K_L (C_{AL}^* - C_{AL}) & (I.8) \end{cases}$$

Où :

N_{AG} : Flux du composé A transféré dans la phase gazeuse (mole de A/m².s)

N_{AL} : Flux du composé A transféré dans la phase liquide (mole de A transféré/m².s)

K'_G : Coefficient de transfert de matière global côté gaz
(mole de A transféré/m².s.atm)

K_L : Coefficient de transfert de matière global côté liquide (m/s)

P_{AG}^* : Pression partielle du composé A qui est en équilibre avec C_{AL} (atm)

C_{AL}^* : Concentration du composé A qui est en équilibre avec P_{AG} (mole de A/m³)

D'après les définitions des deux grandeurs P_{AG}^* et C_{AL}^* , on a :

$$\begin{cases} P_{AG}^* = H \cdot C_{AL} & (I.9) \\ P_{AG} = H \cdot C_{AL}^* & (I.10) \end{cases}$$

I.6. Relation entre les coefficients de transfert de matière globaux et partiels [1]

À partir de l'équation (I.7), on a :

$$\frac{1}{K'_G} = \frac{P_{AG} - P_{AG}^*}{N_{AG}} \rightarrow \frac{1}{K'_G} = \frac{P_{AG} - P_{Ai}}{N_{AG}} + \frac{P_{Ai} - P_{AG}^*}{N_{AG}} \quad (I.11)$$

En utilisant les égalités (I.4) et (I.9), l'équation (I.11) devient :

$$\frac{1}{K'_G} = \frac{P_{AG} - P_{AGi}}{N_{AG}} + \frac{H \cdot C_{ALi} - H \cdot C_{AL}}{N_{AG}} \quad (I.12)$$

On sait que le flux de matière du constituant A dans la phase gazeuse est le même que celui dans la phase liquide, donc :

$$N_{AG} = N_{AL} = k'_G (P_{AG} - P_{AGi}) = k_L (C_{ALi} - C_{AL}) = N_A$$

D'où :

$$\frac{1}{K'_G} = \frac{1}{k'_G} + \frac{H}{k_L} \quad (\text{I.13})$$

On suit le même raisonnement, en considérant cette fois-ci, la relation (I.8) :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{C_{AL}^* - C_{AL}}{N_{AL}} \Rightarrow \frac{1}{K_L} = \frac{C_{AL}^* - C_{ALi}}{N_{AL}} + \frac{C_{ALi} - C_{AL}}{N_{AL}} \quad (\text{I.14})$$

Si on utilise les égalités (I.10) et (I.4), on aura :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{(P_{AG}/H) - (P_{AGi}/H)}{N_{AL}} + \frac{C_{ALi} - C_{AL}}{N_{AL}} \quad (\text{I.15})$$

En utilisant l'égalité (I.3), la relation (I.15) devient :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{H \cdot k'_G} + \frac{1}{k_L} \quad (\text{I.16})$$

I.7. Estimation de k_G , k_L et a [2]

Les estimations des grandeurs de transfert de matière dans des colonnes à garnissage sont nettement mieux établies depuis les travaux de Onda [3] et Puranik [4] et Danckwerts [5], maintes fois vérifiées, on peut considérer les corrélations ci-dessous à quelques 20 - 30% près.

$$\frac{k_G}{A_p D_{AG}} = 5,23 (A_p D_p)^{-2} \left(\frac{V_{SG} \rho_G}{A_p \mu_G} \right)^{0,7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_{AG}} \right)^{1/2} \quad (I.17)$$

$$\frac{k_L}{A_p D_{AL}} = 0,0051 (A_p D_p)^{0,4} \left(\frac{V_{SL} \rho_L}{A_p \mu_L} \right)^{4/3} \left(\frac{V_{SL}^2 A_p}{g} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_{AL}} \right)^{1/2} \quad (I.18)$$

$$a = A_p \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0,75} \left(\frac{V_{SL}^2 \rho_L}{\sigma A_p} \right)^{0,2} \left(\frac{V_{SL}^2 A_p}{g} \right)^{-0,05} \left(\frac{V_{SL} \rho_L}{A_p \mu_L} \right)^{0,1} \right] \right\} \quad (I.19)$$

Avec :

k_G, k_L : Coefficient de transfert de matière partiel côté gaz, côté liquide (m/s)

a : Aire interfaciale (m^2 / m^3 de lit)

A_p : Surface spécifique du garnissage (m^2 / m^3 de lit)

D_p : Dimension caractéristique du garnissage (m)

D_{AG}, D_{AL} : Coefficient de diffusion du composé transféré respectivement dans le gaz et dans le liquide (m^2/s)

V_{SG}, V_{SL} : Vitesse superficielle du gaz, du liquide (m/s)

μ_G, μ_L : Viscosité du gaz, du liquide (kg/m.s)

ρ_G, ρ_L : masse volumique du gaz, du liquide (kg/m^3)

g : accélération gravitationnelle (m/s^2)

σ : Tension superficielle relative à la phase liquide (N/m)

σ_c : tension superficielle critique relative au matériau du garnissage (N/m)

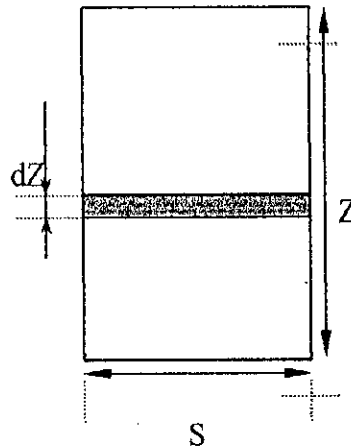
I.8. Calcul de la hauteur de la colonne d'absorption

Considérant une colonne d'absorption, où :

S : section droite de la colonne (m^2)

Z : hauteur de la colonne (m)

dZ : hauteur d'un élément de la colonne (m).



Soient :

$[N_A \cdot a \cdot dZ]$ = [mole de A transféré/aire interfaciale . temps] . [Aire interfaciale/volume de la colonne] . [Hauteur d'un élément de la colonne] . [Section de la colonne]

$[N_A \cdot a \cdot dZ]$ = [mole de A transféré/ $m^2 \cdot s$] . [m^2/m^3] [m]

$[N_A \cdot a \cdot dZ]$ = [mole de A transféré/aire de la section droite de la colonne. Temps]

$$[N_A \cdot a \cdot dZ] = [\text{mole de A transféré}/m^2 \cdot s] / \text{Unité de section} \quad (I.20)$$

Si on multiplie l'équation (I.2) par $(a \cdot dZ)$, on aura :

$$N_{AG} \cdot a \cdot dZ = k'_G (P_{AG} - P_{AGi}) a \cdot dZ \quad (I.21)$$

Et de même pour l'équation (I.7) :

$$N_{AG} \cdot a \cdot dZ = K_G (P_{AG} - P_{AG}^*) a \cdot dZ \quad (I.22)$$

De la même manière, en considérant les relations (I.3) et (I.8) et en multipliant par (a.dZ) on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{AL} \cdot a \cdot dZ = k_L (C_{ALi} - C_{AL}) \cdot a \cdot dZ \\ N_{AL} \cdot a \cdot dZ = K_L (C_{AL}^* - C_{AL}) \cdot a \cdot dZ \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (I.23) \\ (I.24) \end{array}$$

Le bilan de matière pour la colonne d'absorption, donne :

$$G_S Y_{A1} + L_S X_{A2} = G_S Y_{A2} + L_S X_{A1}$$

$$G_S (Y_{A1} - Y_{A2}) = L_S (X_{A1} - X_{A2}) = [\text{mole de A transféré/m}^2 \cdot \text{s}] \quad (I.25)$$

La forme différentielle de l'équation (I.25), s'écrit :

$$G_S dY_A = L_S dX_A \quad (I.26)$$

On constate que les équations (I.20) et (I.25) ont la même dimension, d'où :

$$N_A \cdot a \cdot dZ = G_S dY_A = L_S dX_A \quad (I.27)$$

Nous avons aussi :

$$N_A = K_Y (Y_A - Y_A^*) \quad (I.28)$$

Donc, à partir des relations (I.7) et (I.8), on peut écrire :

$$N_A = K_Y (Y_A - Y_A^*) = K_G (P_{AG} - P_{AG}^*) \quad (I.29)$$

De la même manière, pour la phase liquide :

$$N_A = K_X (X_A^* - X_A) = K_L (C_{AL}^* - C_{AL}) \quad (I.30)$$

A partir des équations (I.27) et (I.30) : on a :

$$N_A \cdot a \cdot dz = K_X (X_A^* - X_A) \cdot a \cdot dZ = L_S dX_A \quad (I.31)$$

D'où :

$$\int_0^Z dZ = \frac{L_s}{K_{x,a}} \int_{x_{A1}}^{x_{A2}} \frac{dx_A}{x_A^* - x_A} \quad (I.32)$$

Donc, l'expression générale de la hauteur de la colonne s'écrira :

$$Z = \frac{L_s}{K_{x,a}} \int_{x_{A1}}^{x_{A2}} \frac{dx_A}{x_A^* - x_A} \quad (I.33)$$

Pour trouver l'expression de Z en fonction des données relatives à la phase gazeuse, on suit le même raisonnement, en considérant les équations (I.27) et (I.29) :

$$N_A \cdot a \cdot dZ = K_y (Y_A - Y_A^*) a dZ = G_s dY_A \quad (I.34)$$

D'où :

$$\int_0^Z dZ = \frac{G_s}{K_{y,a}} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} \quad (I.35)$$

Finalement :

$$Z = \frac{G_s}{K_{y,a}} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} \quad (I.36)$$

Nous pouvons aussi exprimer la hauteur de la colonne en fonction des concentrations du constituant A dans les phases liquide et gazeuse, pour y parvenir, nous faisons le bilan de matière sur la colonne représentée dans la figure I.4.

$$L C_{AL2} + G C_{AG1} = L C_{AL1} + G C_{AG2}$$

$$L (C_{AL1} - C_{AL2}) = G (C_{AG1} - C_{AG2}) = [\text{mole de A transféré} / \text{m}^2 \cdot \text{s}] \quad (I.37)$$

On sait que :

$$[N_A \cdot a \cdot dZ] = [\text{mole de A transféré}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$$

D'où :

$$N_A \cdot a \cdot dZ = L (C_{AL2} - C_{AL1}) = L dC_{AL} \quad (I.38)$$

D'après la relation (I.24), on a :

$$N_{AL} \cdot a \cdot dZ = K_L (C_{AL}^* - C_{AL}) a \cdot dZ \quad (I.39)$$

Donc :

$$K_L (C_{AL}^* - C_{AL}) a \cdot dZ = L dC_{AL} \quad (I.40)$$

et :

$$\int_0^Z dZ = \frac{L}{K_L a} \int_{C_{AL1}}^{C_{AL2}} \frac{dC_{AL}}{C_{AL}^* - C_{AL}} \quad (I.41)$$

Dans la relation (I.41) la grandeur C_A^* n'est pas constante et elle est variable tout au long de la colonne. Dans le cas où la courbe d'équilibre est une "droite", l'intégrale prendra la forme de "la moyenne logarithmique" :

$$\int_{C_{AL1}}^{C_{AL2}} \frac{dC_{AL}}{C_{AL}^* - C_{AL}} = \frac{C_{AL2} - C_{AL1}}{(C_{AL2}^* - C_{AL2}) - (C_{AL1}^* - C_{AL1})} \text{Ln} \left(\frac{C_{AL1} - C_{AL1}^*}{C_{AL2} - C_{AL2}^*} \right) \quad (I.42)$$

D'où, l'expression de la hauteur de la colonne s'écrira :

$$Z = \frac{L}{K_L a} \frac{(C_{AL2} - C_{AL1})}{(C_{AL2}^* - C_{AL2}) - (C_{AL1}^* - C_{AL1})} \text{Ln} \left(\frac{C_{AL1} - C_{AL1}^*}{C_{AL2} - C_{AL2}^*} \right) \quad (I.43)$$

avec :

$$C_{AL1}^* = \frac{P_{AG1}}{H} \quad (I.44)$$

$$P_{AG1} = R \cdot T \cdot C_{AG1} \quad (I.45)$$

$$P_{AG} = R \cdot T \cdot C_{AG2} \quad (I.47)$$

$$C_{A2}^* = \frac{P_{AG2}}{H} \quad (I.46)$$

Où :

P_{AG1} et P_{AG2} : Pressions partielles du composé A dans le mélange gazeux en bas et au sommet de la colonne (atm)

C_{AL1}^* et C_{AL2}^* : Concentrations du composé A dans le liquide qui sont en équilibre avec P_{AG1} et P_{AG2} (mole/m³).

R : Constante des gaz parfaits (L.atm/mole.K) ;

T : Température (K) ;

H : Constante de Henry (atm.m³/mole).

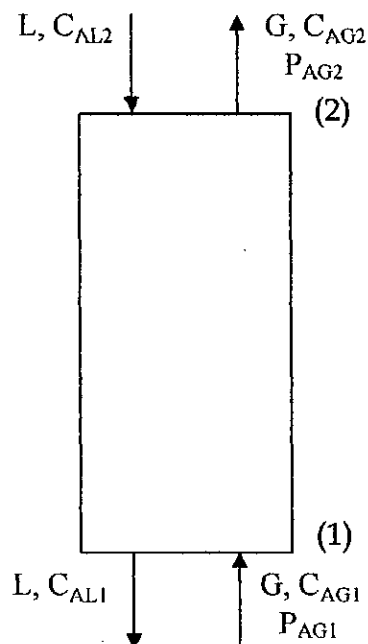


Figure I.4. Colonne d'absorption

Avec :

L : Débit volumique du liquide par unité de section droite de la colonne
($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

G : Débit volumique du gaz par unité de section droite de la colonne
($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

C_{AL1} et C_{AL2} : Concentrations du composé A dans le liquide en bas et au sommet de la colonne (mole de A/ m^3)

C_{AG1} et C_{AG2} : Concentrations du composé A dans le mélange gazeux en bas et au sommet de la colonne (mole de A/ m^3).

Chapitre II

Transfert de matière avec réaction chimique

Nomenclature du chapitre

- A** : CO₂
B : MEA
a : Aire interfaciale (m²/m³ de lit)
C_A : Concentration du composé A (mol/m³)
C_{AG} : Concentration du composé A dans la phase gazeuse (mol/m³)
C_{AL} : Concentration du composé A dans la phase liquide (mol/m³)
C_{ALi} : Concentration du composé A à l'interface côté liquide (mol/m³)
C_B : Concentration du composé B (mol/m³)
C_{BL} : Concentration du composé B dans la phase liquide (mol/m³)
C_{BLi} : Concentration du composé B à l'interface (mol/m³)
D_{AL} : Coefficient de diffusion de A dans la phase liquide (m²/s)
E : Facteur d'accélération
F_A : Le flux spécifique d'absorption du composé A (mol/m³.s)
H a : Nombre adimensionnel appelé nombre de Hatta
J : Nombre adimensionnel
k : Constante de vitesse de réaction (m³/mol.s)
k'_G : Coefficient de transfert de matière partiel côté gaz
(mole de A transféré/m².s.atm)
k_L : Coefficient de transfert de matière partiel côté liquide (m/s)
N_A : Flux de matière du composé A, pour le cas du transfert de matière avec
réaction chimique (mol/m².s)
N_A' : Flux de matière du composé A, pour le cas du transfert de matière sans
réaction chimique (mol/m².s)
N₂ : Nombre adimensionnel
P : Le produit de la réaction
P_{AG} : Pression partielle de A dans la phase gazeuse (atm)
P_{AGi} : Pression partielle de A à l'interface (atm)

r_A : Vitesse de la réaction ($\text{mol/m}^3 \cdot \text{s}$)

α : Nombre adimensionnel

β_1, β_2 : Constantes de l'équilibre

λ : Nombre adimensionnel

δ_G, δ_L : Epaisseur du film respectivement côté gaz et côté liquide (m)

ν_A, ν_B, ν_P : Coefficients stœchiométriques

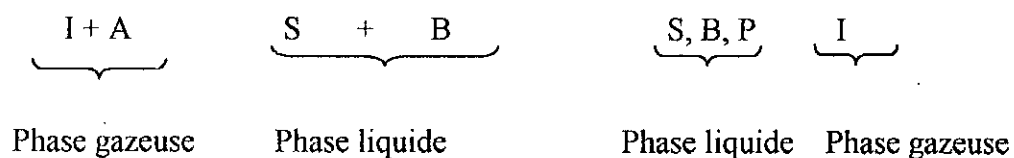
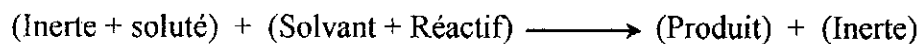
II. Transfert de matière avec réaction chimique

II.1. Principe

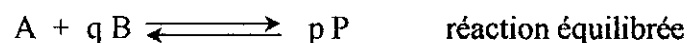
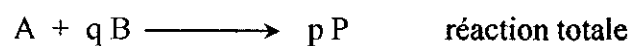
L'absorption d'un gaz accompagnée de réaction chimique en phase liquide permettra d'améliorer l'efficacité de la séparation (par exemple l'absorption du CO_2 dans une solution aqueuse de soude, amine ... etc) et la sélectivité de la séparation (par exemple l'absorption du CO_2 et H_2S dans des solutions d'amine).

Une absorption accompagnée d'une réaction chimique modifie le profil des concentrations à proximité de l'interface et de ce fait affecte le flux de transfert vers la phase où se déroule la réaction (voir figure II.1).

La réaction à étudier étant la suivante :



Au cours de la quelle le soluté (A) réagit avec le réactif (B) en solution pour donner le produit (P) d'après les réactions suivantes :



Cette réaction a un double effet :

- L'augmentation de la capacité d'absorption du liquide puisque le réactif fait disparaître le soluté absorbé et donc la force motrice du transfert est accrue.

- L'accroissement de la vitesse avec laquelle le soluté franchit l'interface pour passer dans le liquide par conséquent l'augmentation du coefficient du transfert de matière.

Ce dernier effet est pris en compte dans les expressions du flux spécifique d'absorption en multipliant le coefficient de transfert de matière partiel en phase liquide par un facteur appelé facteur d'accélération noté E (C'est le rapport des flux "avec" et "sans" réaction chimique) c'est-à-dire :

$$E = \frac{[N_A]_{x=0}}{[N_A']_{x=0}} =$$

Le flux spécifique d'absorption avec réaction chimique s'écrira donc :

$$F_A = N_A \cdot a = k'_G \cdot a \cdot (P_{AG} - P_{Ai}) = E \cdot k_L \cdot a \cdot (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

F_A : Le flux spécifique d'absorption du composé A ($\text{mol/m}^3 \cdot \text{s}$)

N_A : Flux de matière du composé A, pour le cas du transfert de matière avec réaction chimique ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)

a : Aire interfaciale (m^2/m^3 de lit)

k'_G : Coefficient de transfert de matière partiel côté gaz (mole de A transféré/ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$)

k_L : Coefficient de transfert de matière partiel côté liquide (m/s)

P_{AG} : Pression partielle de A dans la phase gazeuse (atm)

P_{AGi} : Pression partielle de A à l'interface (atm)

C_{AL} : Concentration du composé A dans la phase liquide (mol/m^3)

C_{ALi} : Concentration du composé A à l'interface côté liquide (mol/m^3)

Comme tout phénomène de transfert de matière, l'absorption avec réaction chimique peut être décomposée en deux étapes :

- Transfert de A de la phase gazeuse vers l'interface.
- Transfert de A de l'interface vers la phase liquide et réaction entre A et B en phase liquide.

Suivant l'importance respective des différentes étapes, le transfert de matière pourra être contrôlé par une seule ou bien par plusieurs étapes.

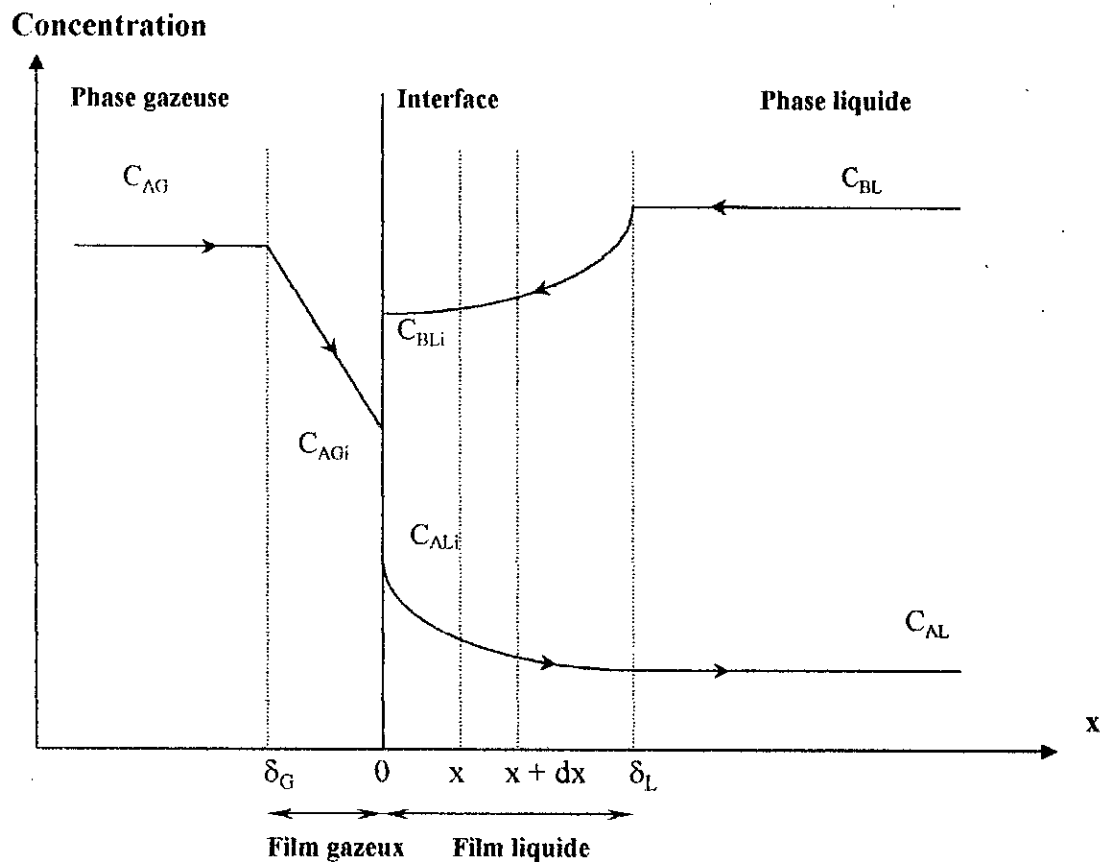


Figure II.1. Profils des concentrations pour le transfert de matière avec réaction chimique.

II.2. Bilan de matière en phase liquide

Le bilan de matière pour le composé A en régime permanent, sur une tranche fine d'épaisseur dx et pour une section unitaire d'aire interfaciale, en appliquant la loi de Fick relative à la diffusion moléculaire dans les milieux quasi-immobiles, s'écrit :

$$\begin{array}{l} \text{Flux de A entrant} + \text{Quantité de A apparaissant} = \text{Flux de A sortant} \\ \text{à l'abscisse } x \quad \text{(ou disparaissant) par unité} \quad \text{à l'abscisse } x + dx \\ \text{de temps} \end{array}$$

$$-D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x + v_A r_A dx = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} \quad (\text{II.2})$$

Pour dx très petit, nous avons :

$$\frac{\left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} - \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x}{dx} = \frac{d\left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right)}{dx} = \frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \quad (\text{II.3})$$

On peut réécrire l'équation (II.2) de la manière suivante :

$$D_{AL} \left\{ \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x+dx} - \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_x \right\} + v_A r_A dx = 0 \quad (\text{II.4})$$

Si on divise l'équation (II.4) par dx , et on utilisant l'égalité (II.3), on aura l'équation différentielle suivante :

$$D_{AL} \left(\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right) + v_A r_A = 0 \quad (\text{II.5})$$

Les conditions aux limites sont :

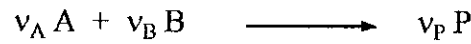
$$\begin{cases} x=0 & ; & C_{AL}(0) = C_{ALi} \\ x=\delta_L & ; & C_{AL}(\delta_L) = C_{AL} \end{cases}$$

L'intégration de l'équation (II.5) est plus ou moins complexe suivant la forme de l'équation de vitesse.

II.3. Expressions de C_A et des densités de flux en phase liquide [2]

II.3.1. Cas d'une réaction de pseudo – premier ordre

Soit la réaction irréversible d'ordre 1 par rapport à chacun des deux réactifs : A et B.



La vitesse de la réaction peut s'écrire de la manière suivante :

$$r_A = k \cdot C_{AL}(x) \cdot C_{BL}(x)$$

Où :

r_A : Vitesse de la réaction ($\text{mol/m}^3 \cdot \text{s}$)

k : Constante de vitesse de la réaction ($\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$)

$C_{AL}(x)$: Concentration du composé A dans la phase liquide (mol/m^3)

$C_{BL}(x)$: Concentration du composé B dans la phase liquide (mol/m^3)

L'équation (II.5) s'écrira comme suit :

$$D_{AL} \left(\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right) + v_A k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = 0; \quad (\text{II.6})$$

En supposant que D_{AL} , k et C_{BL} sont constantes en phase liquide, c'est-à-dire :

$$C_{BL}(x) = C_{BL} = \text{constante} = C_{Be}$$

L'équation (II.6) devient :

$$D_{AL} \left(\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right) + v_A k C_{AL}(x) C_{BL} = 0; \quad (\text{II.7})$$

Avec les conditions aux limites :

$$\begin{cases} x=0 & ; & C_{AL}(0) = C_{ALi} \\ x=\delta_L & ; & C_{AL}(\delta_L) = C_{AL} \end{cases}$$

La solution générale de l'équation (II.7) s'écrit :

$$C_{AL}(x) = \beta_1 \exp(\alpha x) + \beta_2 \exp(-\alpha x) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\alpha = \sqrt{\frac{-v_A k_{CL}}{D_{AL}}}$$

Les conditions aux limites permettent de calculer les constantes β_1 et β_2 :

$$\begin{cases} \text{Pour } x = 0 \Rightarrow \beta_1 + \beta_2 = C_{ALi} \\ \text{Pour } x = \delta_L \Rightarrow \beta_1 \exp(\alpha \delta_L) + \beta_2 \exp(-\alpha \delta_L) = C_{AL} \end{cases}$$

En résolvant ces deux équations, et en remplaçant dans l'équation (II.8), la concentration $C_{AL}(x)$ en phase liquide aura pour expression :

$$C_{AL}(x) = \frac{C_{AL} \operatorname{sh}(\alpha x) + C_{ALi} \operatorname{sh}[\alpha(\delta_L - x)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \quad (\text{II.9})$$

Et le gradient de $C_A(x)$ s'exprime alors par :

$$\frac{dC_{AL}(x)}{dx} = \frac{\alpha C_{AL} \operatorname{ch}(\alpha x) - \alpha C_{ALi} \operatorname{ch}[\alpha(\delta_L - x)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \quad (\text{II.10})$$

On en déduit le flux traversant l'interface :

$$[N_A]_{x=0} = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=0} = \frac{D_{AL} \alpha \delta_L \operatorname{ch}(\alpha \delta_L)}{\delta_L \operatorname{sh}(\alpha \delta_L)} \left\{ C_{ALi} - \frac{C_{AL}}{\operatorname{ch}(\alpha \delta_L)} \right\} \quad (\text{II.11})$$

On peut également exprimer le flux à l'autre extrémité du film, pour $x = \delta_L$:

$$[N_A]_{x=\delta_L} = -D_{AL} \left[\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right]_{x=\delta_L} = k_L \frac{\alpha \delta_L}{\operatorname{th}(\alpha \delta_L)} \left\{ \frac{C_{ALi}}{\operatorname{ch}(\alpha \delta_L)} - C_{AL} \right\} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$k_L = \frac{D_{AL}}{\delta_L}$$

Le terme $(\alpha \delta_L)$ représente un nombre adimensionnel, appelé : nombre de Hatta (Ha), qui est défini par la formule suivante :

$$\alpha \delta_L = Ha = \frac{\sqrt{-v_A k C_{BL} D_{AL}}}{k_L} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

D_{AL} : Coefficient de diffusion du composé A dans la phase liquide (m^2/s).

δ_L : Epaisseur du film côté phase liquide (m).

k_L : Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase liquide, pour le cas du transfert de matière sans réaction chimique (m/s)

k : Constante de vitesse de réaction ($\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$)

On peut alors exprimer la vitesse d'absorption de A, par unité de temps et par unité d'aire interfaciale, en présence de réaction chimique en fonction du nombre de Hatta :

$$[N_A]_{x=0} = k_L \frac{Ha}{\text{th}(Ha)} \left\{ C_{ALi} - \frac{C_{AL}}{\text{ch}(Ha)} \right\} \quad (\text{II.14})$$

On sait que le flux sans réaction chimique a pour formule :

$$[N_A']_{x=0} = k_L (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (\text{II.15})$$

Considérant la grandeur E comme étant le rapport des flux "avec" et "sans" réaction chimique, c'est-à-dire :

$$E = \frac{[N_A]_{x=0}}{[N_A']_{x=0}} = \frac{Ha}{\text{th}(Ha)} \frac{1 - \frac{\lambda}{\text{ch}(Ha)}}{1 - \lambda} \quad (\text{II.16})$$

Avec :
$$\lambda = \frac{C_{AL}}{C_{ALi}}$$

À partir de cette relation, on peut dire que si $Ha \geq 0,3$ alors $E \neq 1$.

Pour examiner la valeur du flux de A à $x = \delta_L$, puis rapporter sa valeur à celle du flux à $x = 0$, on fait le rapport suivant :

$$J = \frac{[N_A]_{x=\delta_L}}{[N_A]_{x=0}} = \frac{1 - \lambda \operatorname{ch}(Ha)}{\operatorname{ch}(Ha) - \lambda} \quad (\text{II.17})$$

Suivant les valeurs du nombre de Hatta, en utilisant les rapports E et J, trois cas existent :

1) **Ha < 0,3** → *Réaction lente* :

$\operatorname{ch}(Ha)$ et J tendent vers 1, il n'y a pratiquement pas de réaction dans le film, celle-ci se déroule essentiellement au cœur de la phase liquide.

Dans ce cas :

$$[N_A]_{x=0} \approx [N_A']_{x=0} = k_A (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (\text{II.18})$$

C'est-à-dire : $E \approx 1$.

2) **0,3 < Ha < 5** → *Cas intermédiaire* : On utilise l'expression (II.16).

3) **Ha > 5** → *Réaction rapide* :

La valeur de $\lambda = C_{AL} / C_{ALi}$ sera faible et tend vers zéro car C_{AL} tend vers zéro, la réaction se passera quasi entièrement dans le film liquide.

Dans ce cas :

$$J = \frac{1}{\operatorname{ch}(Ha)} \quad \text{et} \quad E \approx Ha \quad (\text{II.19})$$

Le flux d'absorption par unité d'aire interfaciale pourra être calculé avec la formule suivante :

$$[N_A]_{x=0} \approx C_{ALi} \cdot k_A \cdot Ha = C_{ALi} \sqrt{k C_{BL} D_{AL}} \quad (\text{II.20})$$

II.3.2. Cas d'une réaction de deuxième ordre

Les relations précédentes ont pu être établies aisément parce que l'on a considéré que $C_{BL}(x)$ était constante dans le film, c'est à dire que :

$$C_{BL}(x) \approx C_{BL} \quad \text{et donc :} \quad \frac{dC_{BL}(x)}{dx} \approx 0 \quad (\text{II.21})$$

Nous devons également envisager le cas où cette hypothèse n'est pas vérifiée. Dans ce cas il n'est pas possible d'obtenir une expression analytique pour $[N_A]_{x=0}$. On peut toutefois obtenir une solution numérique.

L'expression (II.2) s'écrit pour les composés A et B de la manière suivante :

$$D_{AL} \left[\frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \right] + v_A k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = 0 \quad (\text{II.22.a})$$

$$D_{BL} \left[\frac{d^2 C_{BL}(x)}{dx^2} \right] + v_B k C_{AL}(x) C_{BL}(x) = 0 \quad (\text{II.22.b})$$

On utilise les conditions limites suivantes pour les intégrations :

$$x = 0 \quad C_{AL} = C_{ALi} \quad \frac{dC_{BL}(0)}{dx} = 0 \quad (\text{II.23})$$

$$x = \delta \quad C_{AL}(\delta) = C_{AL} \quad C_B(\delta) = C_{BL} \quad (\text{II.24})$$

Remarque

La relation (II.23) résulte du non transfert du composé considéré vers la phase gazeuse c'est à dire il n'y a pas désorption du CO_2 .

En combinant les équations (II.22.a) et (II.22.b) on obtient :

$$\frac{d^2 C_{BL}(x)}{dx^2} = \frac{v_B D_{AL}}{v_A D_{BL}} \frac{d^2 C_{AL}(x)}{dx^2} \quad (\text{II.25})$$

En intégrant deux fois et en utilisant les conditions aux limites, on obtient :

$$C_{BL}(x) = C_{BL} \left\{ 1 + \frac{v_B D_{AL} C_{AL}(x) - C_{AL}}{v_A D_{BL} C_{BL}} \left[\frac{(\delta - x) \left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right)_{x=0}}{C_{AL}(x) - C_{AL}} = 1 \right] \right\} \quad (II.26)$$

mais :

$$[N_1]_{x=0} = \frac{D_{AL}}{\delta} (C_{ALi} - C_{AL})$$

$$[N_1']_{x=0} = -D_{AL} \left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right)_{x=0}$$

Et donc :

$$E = \frac{[N_1']_{x=0}}{[N_1]_{x=0}} = - \left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right)_{x=0} \frac{\delta}{C_{ALi} + C_{AL}} \quad (II.27)$$

L'expression (II.26), écrite pour les conditions de l'interface, s'écrit :

$$C_{BLi} = C_{BL} \left\{ 1 + \frac{v_B D_{AL} C_{ALi}}{v_A D_{BL} C_{BL}} (1 - \lambda)(1 - E) \right\} \quad (II.28.a)$$

En introduisant le groupe :

$$N_2 = \frac{v_A D_{BL} C_{BL}}{v_B D_{AL} C_{ALi}}$$

$$C_{BLi} = C_{BL} \left\{ 1 + \frac{(1 - \lambda)(1 - E)}{N_2} \right\} \quad (II.28.b)$$

Pour pouvoir exprimer $[N_1']_{x=0}$ il faut pouvoir disposer du terme

$$\left(\frac{dC_{AL}(x)}{dx} \right)_{x=0}$$

On peut y parvenir en écrivant que le flux interfacial répondant à l'équation (II.5) avec $C_{BL}(x) = C_{BLi}$ pratiquement constant près de l'interface, car :

$$\left(\frac{dC_{BL}(x)}{dx} \right)_{x=0} = 0$$

Donc on peut écrire :

$$D_{AL} \left(\frac{d^2 C_A(x)}{dx^2} \right) = -v_A k C_{BLi} C_{AL}(x) \quad \text{pour } x \text{ voisin de } 0$$

L'intégration de cette équation conduit à :

$$[N_1']_{x=0} = k_A \frac{\frac{\sqrt{-v_A k C_{BLi} D_{AL}}}{k_A}}{\text{th} \left(\frac{\sqrt{-v_A k C_{BLi} D_{AL}}}{k_A} \right)} \left[C_{ALi} - \frac{C_{AL}}{\text{ch} \left(\frac{\sqrt{-v_A k C_{BLi} D_{AL}}}{k_A} \right)} \right] \quad (\text{II.29})$$

On remarque que cette expression est identique à la relation (II.11) à la différence que C_{BL} a été remplacé par C_{BLi} .

Donc le facteur d'accélération peut s'écrire :

$$E = \frac{[N_1']_{x=0}}{[N_1]_{x=0}} = \frac{\text{Ha} \sqrt{1 - \frac{(E-1)(1-\lambda)}{N_2}}}{\text{th} \left[\text{Ha} \sqrt{1 - \frac{(E-1)(1-\lambda)}{N_2}} \right]} \frac{1 - \frac{\lambda}{\text{ch} \left[\text{Ha} \sqrt{1 - \frac{(E-1)(1-\lambda)}{N_2}} \right]}}{1-\lambda} \quad (\text{II.30})$$

II.3.3. Expression de Kishinevskii [6]

Nous avons une expression fournie par Kishinevskii qui est sous la forme suivante :

$$E = 1 + \frac{\text{Ha}}{A} \left[1 - \exp(-0.65 \text{Ha} \sqrt{A}) \right] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$A = \frac{\text{Ha}}{N_2} + \exp \left[\frac{0.68}{\text{Ha}} - \frac{0.45}{N_2} \text{Ha} \right]$$

Cette expression nous permet de voir la limite du régime de réaction rapide ($Ha > 5$) et il est facile de voir les limites du régime de réaction de pseudo premier ordre rapide et de la réaction instantanée.

➤ *REACTION DE PSEUDO PREMIER ORDRE RAPIDE :*

$$E_{lim} = Ha \quad \text{dès que } Ha > 5 \quad \text{et} \quad Ha/N_2 < 0.1$$

➤ *REACTION INSTANTANÉE :*

$$E = 1 + N_2 \quad \text{dès que } Ha > 5 \quad \text{et} \quad Ha/N_2 > 10$$

II.3.4. Réaction instantanée

Si la réaction $A + B \rightarrow \text{produits}$, peut être considérée comme réaction instantanée et en supposant toujours que seul le CO_2 est transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide qui comporte le composé B, c'est le MEA dans notre cas, alors dans ce cas A et B ne peuvent pas coexister en même temps dans la phase liquide, alors la situation sera décrite par la figure suivante.

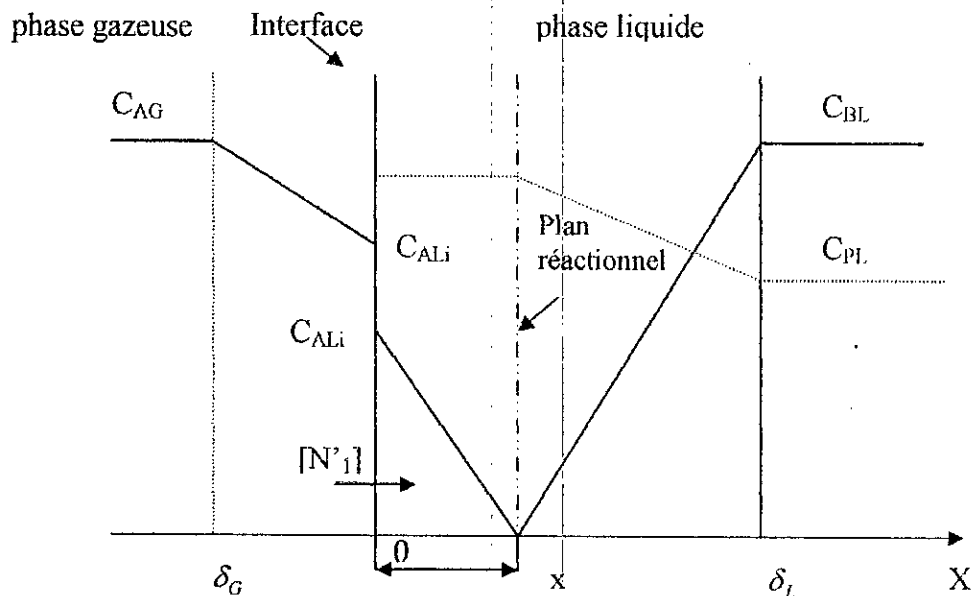


Figure II.2. Profils de concentration près de l'interface dans le cas d'une réaction instantanée.

- Dans la première tranche de 0 à x il y aura présence de A et le produit mais pas celle de B.
- Au delà d'une distance x il y aura présence de B et produit mais pas de A.

La distance x marque la présence d'un plan réactionnel, en ce point les flux respectifs et en sens contraire de A et de B seront dans le rapport des coefficients stœchiométriques.

Si on n'a pas ce cas alors il y aura un déplacement de l'interface (point x) jusqu'à satisfaction de la condition et ainsi disparition de l'excédant de l'un des réactifs.

- Le flux de A compté dans le sens des x croissants s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Flux de A} = D_{AL} \left(\frac{C_{ALi} - 0}{0 - x} \right) = D_{AL} \frac{C_{ALi}}{x} \quad (\text{II.32})$$

- Le flux de B compte dans le sens des x décroissants s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Flux de B} = D_{BL} \left(\frac{C_{BL} - 0}{\delta_L - x} \right) \quad (\text{II.33})$$

Le rapport des flux doit être égale au rapport des coefficients stœchiométriques alors on obtient la relation suivante :

$$\frac{\frac{D_{AL} C_{ALi}}{x}}{\frac{D_{BL} C_{BL}}{(\delta_L - x)}} = \frac{v_A}{v_B} \quad (\text{II.34})$$

Donc on obtient la formule suivante:

$$x = \frac{v_B D_{AL} C_{ALi} \delta_L}{v_A D_{BL} C_{BL} + v_B D_{AL} C_{ALi}} \quad (\text{II.35})$$

- 1) En absence de réaction chimique et pour $C_{AL} = 0$ pour pouvoir effectuer la comparaison nous aurions les résultats suivants :

$$[N_A]_{X=0} = \frac{D_{AL}}{\delta} C_{ALi} \quad (II.36)$$

- 2) En présence de réaction chimique on obtient la relation suivante :

$$[N_A]_{X=0} = \frac{D_{AL}}{X} C_{ALi} \quad (II.37)$$

$$E = \frac{\delta}{X} \quad (II.38)$$

Donc le facteur d'accélération E aura pour expression :

$$E = 1 + N_2 \quad (II.39)$$

On remarque que cette expression représente le deuxième cas limite de l'expression de Kishinevskii.

Chapitre III

Modélisation et simulation de la colonne d'absorption

Nomenclature du chapitre

- A** : CO₂
B : MEA
a : Aire interfaciale (m²/m³ de lit)
C_{AG} : Concentration du composé A dans la phase gazeuse (mol/m³)
C_{AGi} : Concentration du composé A à l'interface côté gaz (mol/m³)
C_{AL} : Concentration du composé A dans la phase liquide (mol/m³)
C_{ALI} : Concentration du composé A à l'interface côté liquide (mol/m³)
C_{A(e)} : Concentration du composé A dans la phase gazeuse à l'entrée de la colonne (mol/m³)
C_{A(s)} : Concentration du composé A en phase gazeuse en sortie de la colonne (mol/m³)
C_{BL} : Concentration du composé B dans la phase liquide (mol/m³)
C_{B(e)} : Concentration de B dans la phase liquide à l'entrée de la colonne (mol/m³)
C_{B(s)} : Concentration du composé B en sortie de la colonne (mol/m³)
D_{AL} : Coefficient de diffusion du composé A dans la phase liquide (m²/s)
D_{BL} : Coefficient de diffusion du composé B dans la phase liquide (m²/s)
E : Facteur d'accélération
dz : Hauteur d'une tranche de la colonne d'absorption.
F_A : Le flux du composé A transféré vers la phase liquide (mol/m³ .s).
G,L : Débit volumique de l'air et de la phase liquide (m³/s)
Ha : Nombre adimensionnel appelé nombre de Hatta
k : Constante de vitesse de réaction (l/mol . s)
k_{AG} : Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase gazeuse (m/s)
k_{AL} : Coefficient de transfert de matière du composé A dans la phase liquide (m/s)
m : Pente de la droite d'équilibre entre phases.

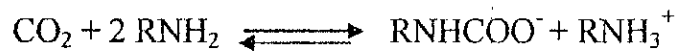
- N_A : Flux de matière du composé A transféré vers la phase liquide dans le cas du transfert de matière avec réaction chimique ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)
- r_A : Vitesse de la réaction ($\text{mol/m}^3 \cdot \text{s}$)
- U_g : La vitesse moyenne d'écoulement du flux gazeux (m/s)
- U_L : La vitesse moyenne d'écoulement du flux liquide (m/s)
- T : Température (K)
- Z : Hauteur de la colonne à garnissage (m)
- ζ_L : Rétention liquide

III. Modélisation et simulation de la colonne d'absorption

Dans cette étude, nous présenterons un modèle mathématique permettant d'estimer les concentrations du CO₂ et de la MEA le long de la colonne à garnissage opérant à contre courant à des températures de 25°C et 40°C.

III.1. Cinétique de la réaction entre le CO₂ et la MEA

La réaction entre le CO₂ (A) et la MEA (B) peut s'écrire de la manière suivante [7, 8, 9]:



Tant que le nombre de mole de CO₂ absorbé est inférieur à la moitié du nombre de moles d'amines présentes dans la solution avant le début de l'absorption, on peut considérer que seul la réaction ci – dessus se déroule[2]. Sa vitesse s'exprime comme suit:

$$r = k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL} \quad (\text{III.1})$$

avec :

$$\text{Log}_{10} k = 10,99 - \frac{2152}{T} \quad (\text{l/mol.s}) \quad [10] \quad (\text{III.2})$$

T : Température (K)

k : Constante de la vitesse de la réaction (l/mol.s)

III.2. Modélisation de la colonne d'absorption

Afin de simplifier la résolution de l'équation du modèle, les hypothèses suivantes ont été proposées :

- Toutes les propriétés physiques du gaz et du liquide sont constantes le long de la colonne et au cours du temps.
- L'écoulement est en régime permanent.
- Le processus est isotherme.
- La dispersion axiale est négligeable dans la phase gazeuse et dans la phase liquide.
- Réaction rapide entre le CO₂ et la MEA ($Ha > 5$).

Dans ces conditions, les équations du modèle se réduisent à l'écriture des bilans de matière partiels dans chaque phase, auxquelles s'ajoutent les relations traduisant les conditions aux limites et d'équilibre.

Puisque, nous nous intéressons à l'évolution de la concentration du CO_2 et de la MEA le long de la colonne d'absorption, nous avons effectué le bilan de matière sur le « CO_2 » dans la phase gazeuse et dans la phase liquide sur un élément (dz) et le bilan de matière sur la MEA en phase liquide (figure III.1).

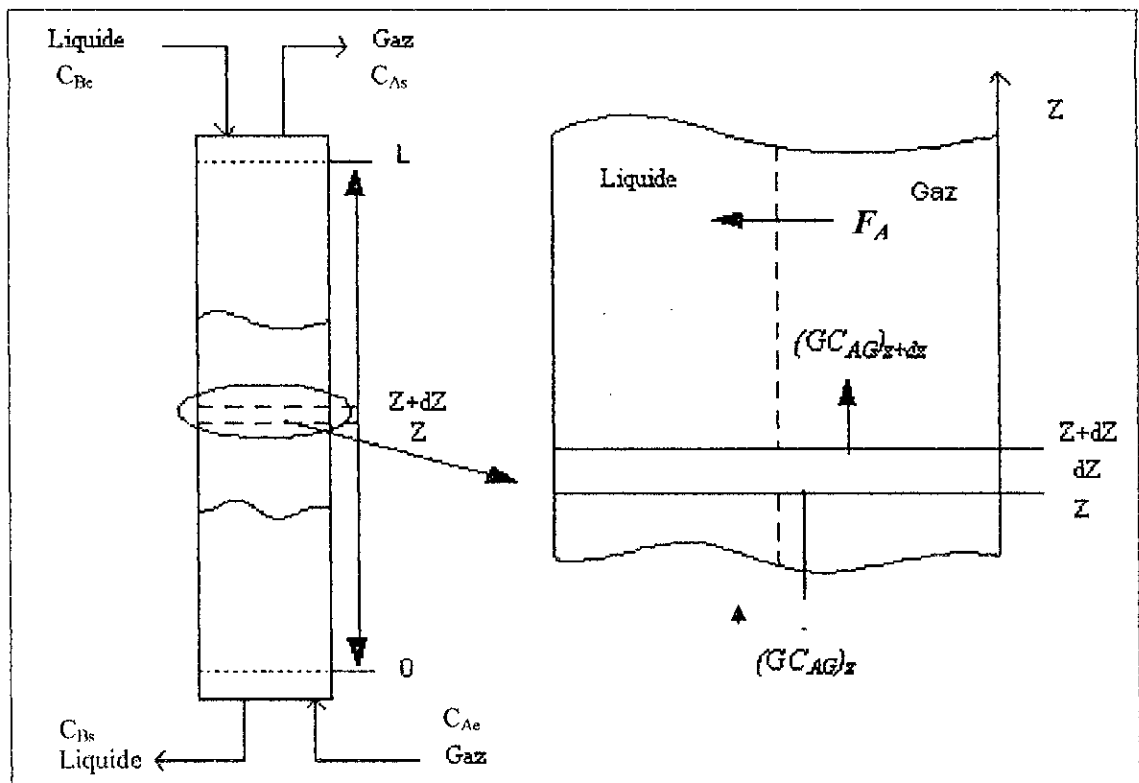


Figure III.1. Bilan de matière sur une tranche élémentaire (dz).

En régime établi on peut écrire

- Bilan de matière sur le CO_2 dans la phase gazeuse :

Quantité de soluté = quantité de soluté + quantité de soluté transféré
à l'entrée (z) en sortie (z + dz) de la phase gazeuse vers la
phase liquide

Soit le bilan de matière sur une tranche dz dans la phase gazeuse :

$$(G C_{AG})_z = (G C_{AG})_{z+dz} + F_A \cdot S \cdot dz \quad (III.3)$$

Or :

$$(G C_{AG})_{z+dz} = (G C_{AG})_z + \frac{d}{dz} (G C_{AG}) dz \quad (III.4)$$

Etant donné que G (débit d'air) est constant le long de la colonne :

alors :

$$\boxed{\frac{G}{S} \cdot \frac{dC_{AG}}{dz} + F_A = 0} \quad (III.5)$$

Soit $U_g = \frac{G}{S}$: la vitesse moyenne d'écoulement, alors l'équation (III.5) s'écrit :

$$\boxed{U_g \cdot \frac{dC_{AG}}{dz} + F_A = 0} \quad (III.6)$$

- Bilan de matière sur le CO_2 dans la phase liquide :

$$(L C_{AL})_z = (L C_{AL})_{z+dz} - F_A \cdot S \cdot dz - [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L \cdot S \cdot dz \quad (III.7)$$

Avec: ζ_L : Rétention liquide.

Or:

$$(L C_{AL})_{z+dz} = (L C_{AL})_z + \frac{d}{dz}(L C_{AL})dz \quad (III.8)$$

$$\frac{d}{dz}(L C_{AL})dz - F_A \cdot S \cdot dz - [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L S dz = 0 \quad (III.9)$$

D'où :

$$\boxed{\frac{L}{S} \cdot \frac{dC_{AL}}{dz} - F_A - [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L = 0} \quad (III.10)$$

Soit $U_L = \frac{L}{S}$: La vitesse moyenne d'écoulement du flux liquide, alors l'équation

(III.10) s'écrit :

$$\boxed{U_L \cdot \frac{dC_{AL}}{dz} - F_A - [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L = 0} \quad (III.11)$$

- *Bilan sur la MEA dans la phase liquide :*

$$(L C_{BL})_z = (L C_{BL})_{z+dz} - 2 \cdot [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L S dz \quad (III.12)$$

Or:

$$(L C_{BL})_{z+dz} = (L C_{BL})_z + \frac{d}{dz}(L C_{BL})dz \quad (III.13)$$

$$\frac{d}{dz}(L C_{BL})dz - 2 \cdot [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L S dz = 0 \quad (III.14)$$

D'où :

$$\frac{L}{S} \cdot \frac{dC_{BL}}{dz} - 2 \cdot [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L = 0 \quad (\text{III.15})$$

$$U_L \cdot \frac{dC_{BL}}{dz} - 2 \cdot [k \cdot C_{AL} \cdot C_{BL}] \cdot \zeta_L = 0 \quad (\text{III.16})$$

Les bilans de matière sur le CO_2 et la MEA dans les phases liquide et gazeuse se réduisent aux équations suivantes :

- *Bilan sur le CO_2 dans la phase gazeuse :*

$$U_G \cdot \frac{dC_{AG}}{dz} + F_A = 0 \quad (\text{III.17})$$

- *Bilan sur la MEA dans la phase liquide :*

$$U_L \cdot \frac{dC_{BL}}{dz} - 2F_A = 0 \quad (\text{III.18})$$

- Expression de F_A :

$$F_A = [N_A] \cdot a \quad (\text{III.19})$$

$$[N_A] = E \cdot [N'_A] = E \cdot k_{AL} (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (\text{III.20})$$

avec : $C_{AL} \approx 0$

donc :

$$F_A = a \cdot E \cdot k_{AL} \cdot C_{ALi} \quad (\text{III.21})$$

En admettant que l'équilibre est établi à l'interface gaz – liquide, et pour des faibles concentrations du CO_2 (A), nous pouvons écrire :

$$C_{AGi} = m \cdot C_{ALi} \quad (\text{III.22})$$

$$[N_A] = k_{AG} (C_{AG} - m \cdot C_{ALi}) = E \cdot k_{AL} \cdot C_{ALi} \quad (\text{III.23})$$

d'où :

$$C_{ALi} = \frac{k_{AG} \cdot C_{AG}}{E \cdot k_{AL} + m \cdot k_{AG}} \quad (\text{III.24})$$

La procédure de calcul du flux local (F_A) du composé A transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide est la suivante [11]:

Nous supposons que les données suivantes ont pu être recueillies a, k_{AG} , k_{AL} , C_{AG} , C_{BL} , D_{AL} , D_{BL} et m.

- Nous commençons par calculer le nombre de Hatta (Ha) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k C_{BL} D_{AL}}}{k_{AL}} \quad (III.25)$$

- Nous estimons une valeur de E en faisant par exemple $E(1) = Ha$ et nous calculons C_{ALi} et N_2 :

$$C_{ALi} = \frac{k_{AG} \cdot C_{AG}}{E(i)k_{AL} + m \cdot k_{AG}} \quad (III.26)$$

et

$$N_2 = \frac{1 D_{BL} C_{BL}}{2 D_{AL} C_{ALi}} \quad (III.27)$$

Nous estimons $E(i+1)$ à partir de l'expression de Kishinevskii [6]:

$$E(i+1) = 1 + \frac{Ha}{A} \left[1 - \exp(-0.65 Ha \sqrt{A}) \right]$$

avec :

$$A = \frac{Ha}{N_2} + \exp \left[\frac{0.68}{Ha} - \frac{0.45}{N_2} Ha \right]$$

Si la valeur de $E(i+1)$ est différente de $E(i)$, nous poursuivons le calcul itérative de manière itérative jusqu'à ce que $E(n+1) \approx E(n)$. La valeur de $E(n)$ est alors prise comme valeur de E.

Le flux de N_A du composé (A) transféré de la phase gazeuse vers la phase liquide peut se calculer de l'expression suivante :

$$[N_A] = E_{(final)} \cdot k_{AL} \cdot C_{ALi (final)} \quad (III.28)$$

Le flux est calculé à partir de l'expression suivante:

$$[F_A] = a \cdot E_{(final)} \cdot k_{AL} \cdot C_{ALi (final)} \quad (III.29)$$

Les paramètres utilisés dans la modélisation de la colonne d'absorption sont donnés dans le tableau III.1 et III.2.

Tableau III.1. Paramètres utilisés dans la modélisation, à T = 40°C

$S = 0,0044 \text{ m}^2$	
$m = 1,2$	[12]
$\log_{10}(k) = 10,99 - 2152 / T$	[10]
$k = 13 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	[10]
$D_{AL} = 1,54 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	[10]
$D_{BL} = 1,15 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	[13]
$k_{AL} = 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot (U_L)^{0,67}$	[3]
$k_{AG} = 5,85 \cdot 10^{-2} \cdot (U_G)^{0,7}$	[3]
$a = 469,11 [1 - \exp(-3,3 \cdot U_L^{0,4})]$	[3]

Tableau III.2. Paramètres utilisés dans la modélisation à T = 25°C

$S = 0,0044 \text{ m}^2$	
$m = 1,2$	[12]
$\log_{10}(k) = 10,99 - 2152 / T$	[10]
$k = 5,87 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	[10]
$D_{AL} = 1,51 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	[10]
$D_{BL} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	[13]
$k_{AL} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (U_L)^{0,67}$	[3]
$k_{AG} = 5,81 \cdot 10^{-2} \cdot (U_G)^{0,7}$	[3]
$a = 469,11 [1 - \exp(-3,3 \cdot U_L^{0,4})]$	[3]

III.3. Procédure de simulation de la colonne d'absorption [14]

Pour pouvoir déterminer les concentrations du CO₂ et de la MEA le long de la colonne, nous avons conçu un programme qui permet la résolution numérique du système d'équations (III.27), (III.28).

Pour cela nous avons divisé la colonne en n tranches de hauteur Δz (Figure III.2), et pour chaque tranche nous avons calculé le facteur d'accélération E, ainsi que le flux transféré du CO₂ (F_A).

Connaissant le flux transféré du CO₂ (F_A) et en intégrant le système d'équation (III.27), (III.28), nous calculerons les concentrations de la MEA et du CO₂ dans différentes tranches dz et ainsi de suite jusqu'à atteindre la n^{ème} tranche.

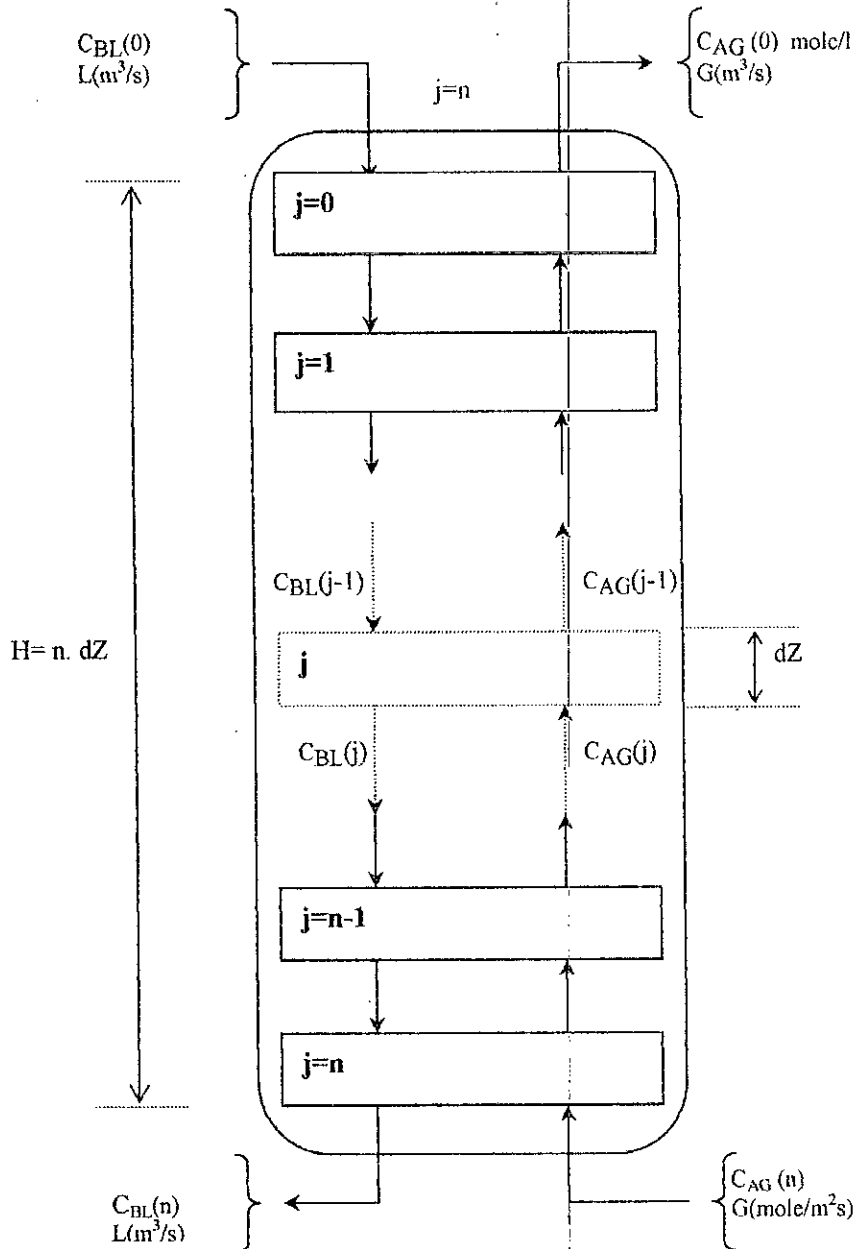


Figure III.2. Discrétisation de la colonne d'absorption

Les Différentes étapes de l'élaboration du programme sont les suivantes :

1. Calcul du coefficient d'accélération E

Pour le calcul du facteur d'accélération E, nous avons conçu une procédure qui est appelée par le programme principale pour chaque tranche (i).

La démarche suivie pour calculer E (i) au point Z(i) est la suivante :

- 1) Entrer les différentes concentrations de sortie de la tranche (i-1) et les différents paramètres tel que les coefficients de transfert, la constante de vitesse de la réaction, aire interfaciale,... etc.
- 2) Calculer le nombre de Hatta [équation (III.29)].
- 3) Initialiser E en lui affectant la valeur calculée du nombre de Hatta.
- 4) Calcul de C_{ALi} [équation (III.30)] et de N_2 [équation (III.31)]
- 5) Utiliser la corrélation de Kishinevskii pour avoir une nouvelle valeur de E.
- 6) Comparer l'ancienne valeur de E avec la nouvelle calculée par la corrélation.
- 7) Si elle est supérieur de 1%, on refait le calcul tout en affectant à E celle calculer par la corrélation.
- 8) Si elle est inférieur à 1% on prend cette valeur.

2. Algorithme du programme principal

- On lui introduit les différentes valeurs des paramètres a , k_{AG} , k_{AL} , hauteur de la colonne, section de la colonne D_{AL} , D_{BL} , m , température, débit du liquide (L), débit d'air (G), débit de CO_2 .
- On lui introduit les concentrations du CO_2 et du MEA initiales en tête de la colonne $Z(i) = 0$.
- Le programme appelle la procédure qui nous permet de calculer le coefficient d'accélération E et le flux transférer (F_A).
- Nous calculons les concentrations du CO_2 et de la MEA en sortie de la tranche d'indice (i).
- Le calcul se poursuit jusqu' à atteindre la tranche d'indice n.
- Nous vérifions si la différence entre la concentration du CO_2 à l'entrée de la colonne $C_{A(c)}$ calculée par le programme avec $C_{A(e)}$ la concentration expérimentale du CO_2 à l'entrée de la colonne d'absorption. Si cette différence est inférieure à 0.01 le programme s'arrête, si non nous allons reprendre le calcul : en choisissant une autre valeur de la concentration du CO_2 en sortie de la colonne d'absorption.
- En fin du programme, nous afficherons les valeurs des concentrations du CO_2 et la MEA en sortie de la colonne ($C_{A(s)}$, $C_{B(s)}$).

La figure III.3, représente la procédure de calcul de E, N_A et F_A :

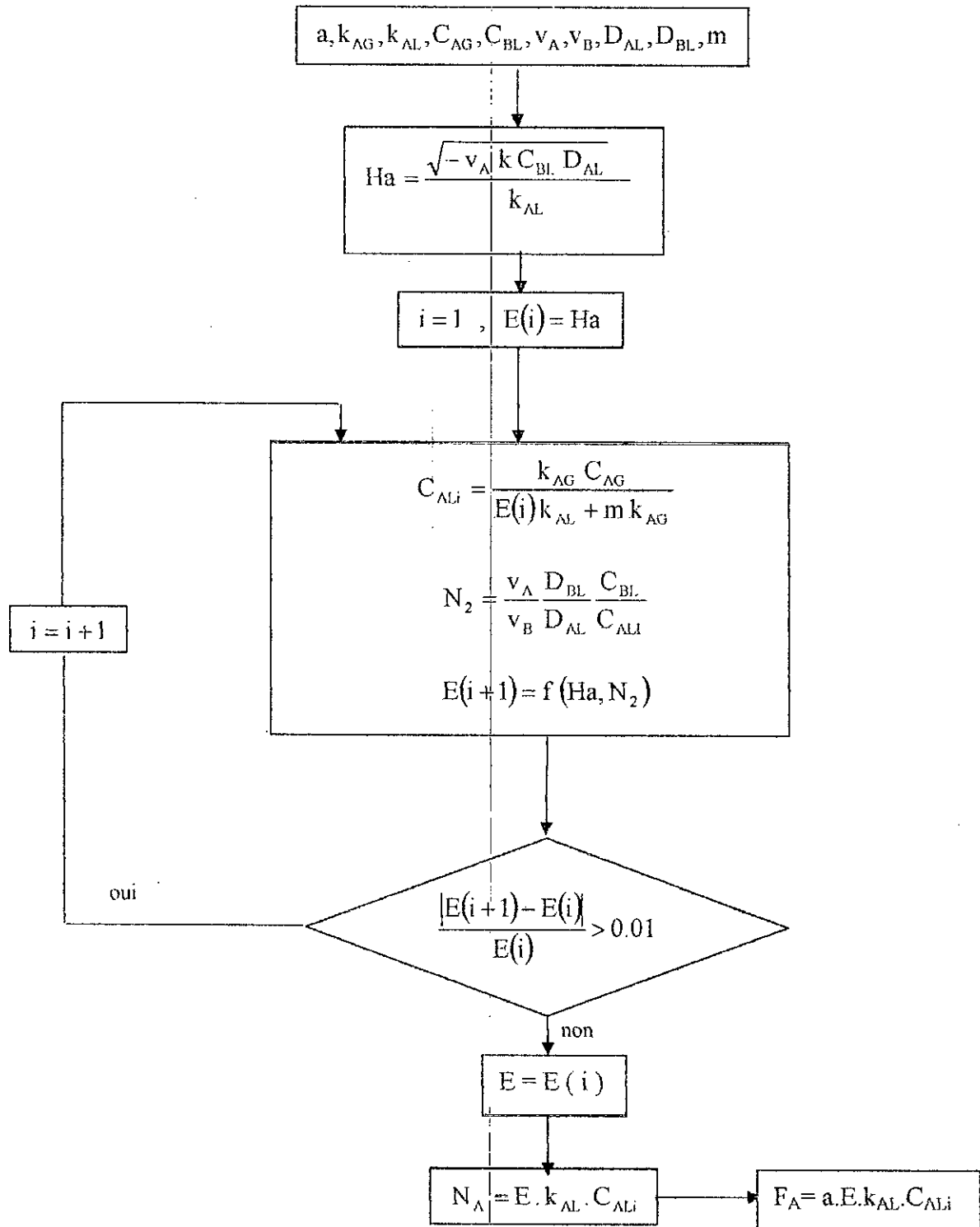


Figure III.3. Procédure de calcul du coefficient d'accélération (E) et de flux transféré (F_A).

La figure III.4, représente l'organigramme de la procédure de calcul des concentrations du CO₂ et de la MEA en sortie de la colonne d'absorption.

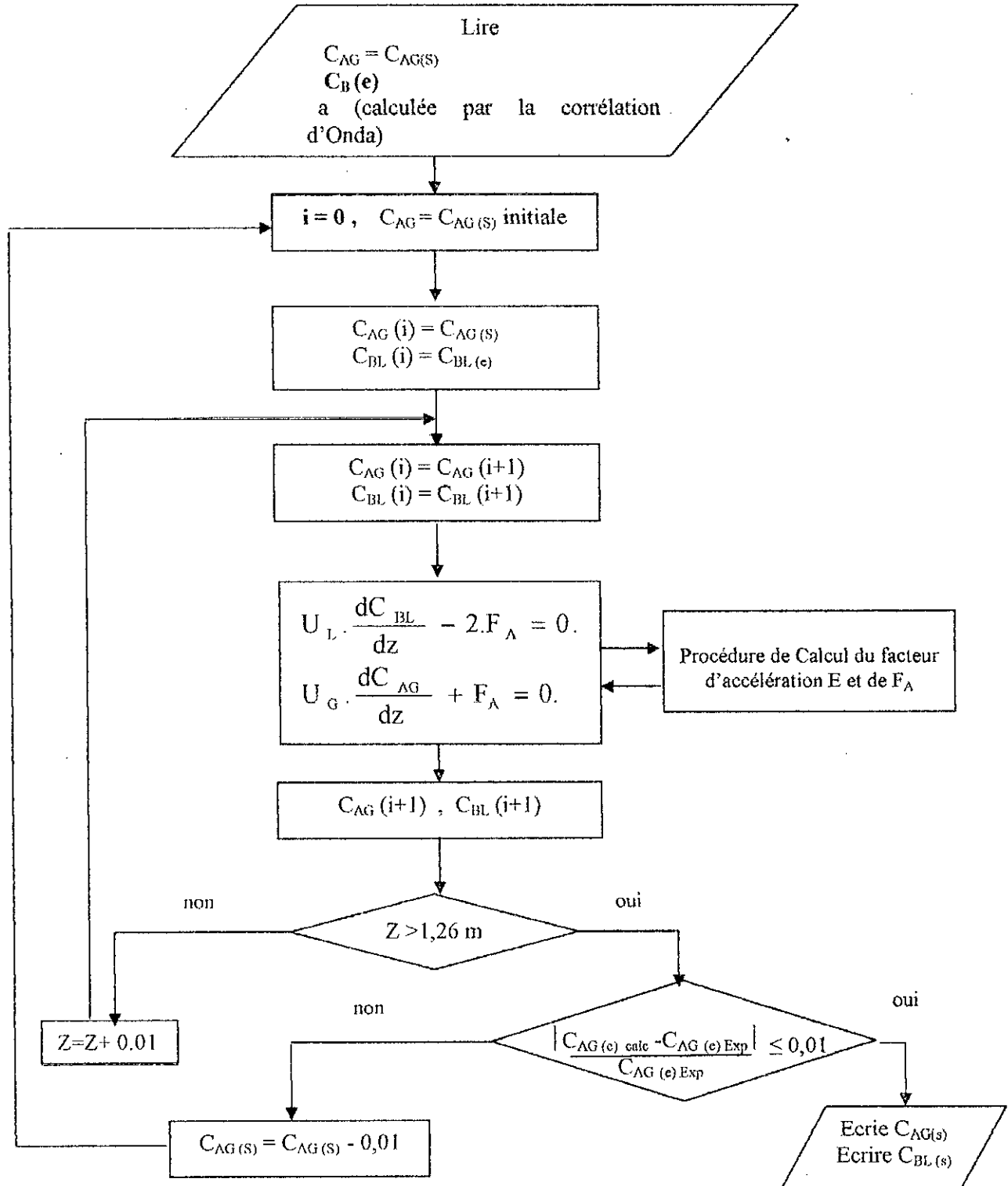


Figure III.4. Organigramme du programme de calcul des concentrations du CO₂ et de la MEA en sortie de la colonne d'absorption.

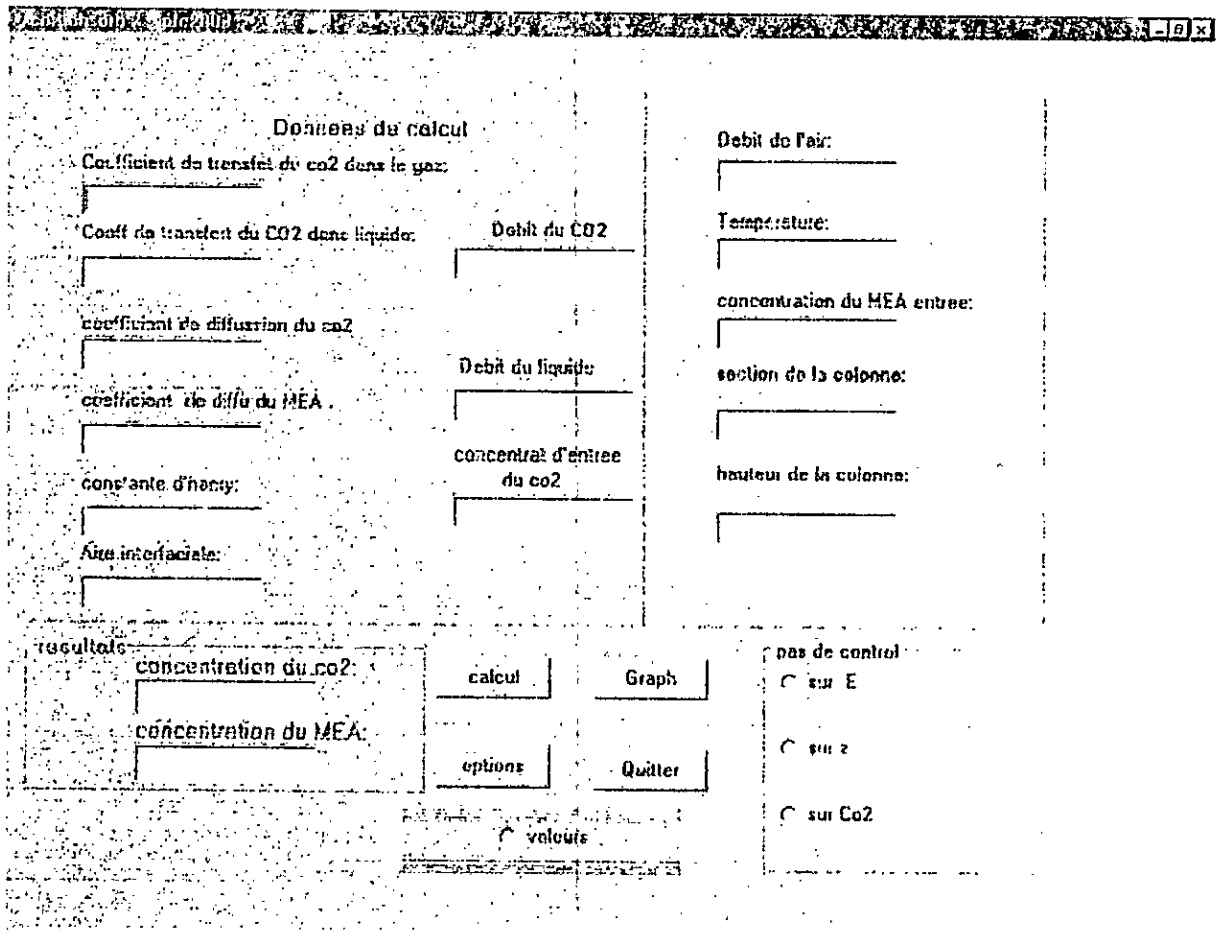


Figure III.5. Interface graphique du programme de calcul des concentrations de la MEA et du CO₂ en sortie de la colonne d'absorption.

Chapitre IV

Partie expérimentale

Nomenclature du chapitre

a	: Aire interfaciale (m^2/m^3 de lit).
a_p	: Surface du grain (m^2).
A_p	: Aire géométrique du garnissage (m^2/m^3).
C_{A(e)}	: Concentration du composé A dans la phase gazeuse à l'entrée de la colonne (mol/m^3).
C_{A(s)}	: Concentration du composé A dans la phase gazeuse en sortie de la colonne (mol/m^3).
C_{B(e)}	: Concentration du composé B dans la phase liquide à l'entrée de la colonne (mol/m^3).
C_{B(s)}	: Concentration du composé B dans la phase liquide en sortie de la colonne (mol/m^3).
D	: Diamètre extérieur du grain du garnissage (mm).
d	: Diamètre intérieur du grain du garnissage (mm).
D_{colonne}	: Diamètre de la colonne (m).
D_p	: Diamètre équivalent du grain (m).
e	: L'épaisseur du grain du garnissage (mm).
G, Q_{air}	: Débit volumique de l'air (m^3/s).
L	: Débit volumique de la solution (m^3/s).
m	: Pente de la droite d'équilibre physique entre phase.
N_{MEA}	: Normalité de la solution de MEA.
N_{HCl}	: Normalité de la solution d'HCl.
n	: Nombre de grain (anneaux de Raschig).
Q_{CO2}	: Débit volumique du CO ₂ (m^3/s).
S_p	: Surface spécifique du grain (m^2/m^3).
V_{MEA}	: Volume de la solution de MEA et (ml).
V_{HCl}	: Volume de la solution d'HCl (ml).
V₀	: Volume occupé par le garnissage au sein de la colonne (m^3).
V₁	: Volume de la colonne à garnissage (m^3).
V₂	: Volume du vide au sein de la colonne (m^3).

- V_P : Volume du grain du garnissage (m^3).
- Z : Hauteur de la colonne à garnissage (m).
- φ_{CO_2} : Quantité de CO_2 consommée par la réaction (mol/m^3).
- φ_{MEA} : Quantité de la MEA consommée par la réaction (mol/m^3).
- ε_g : Fraction du vide d'un grain.
- $\varepsilon_{colonne}$: Porosité de la colonne
- $\Delta P_{colonne}$: Perte de charge dans la colonne

IV. Partie expérimentale

Le procédé d'absorption met en jeu plusieurs paramètres à savoir les concentrations du CO_2 , de la MEA et de la température. Pour pouvoir étudier l'influence de tous ces paramètres, il faut effectuer un grand nombre d'expériences.

L'étude consiste à faire varier la concentration du CO_2 , tout en fixant celle de la MEA, et vice-versa.

IV.1. Description et fonctionnement de la colonne d'absorption

La colonne d'absorption que nous avons utilisé dans notre étude a une hauteur de 1,60 m et un diamètre de 7,5 cm (Figure IV.1). Elle est entièrement fabriquée en verre et possède deux tronçons superposés dont la hauteur est de 63 cm chacun. Chaque tronçon contient des grains de garnissage en vrac. Le garnissage est du type Anneaux Raschig en PVC dont la dimension caractéristique est de 10 mm.

La colonne fonctionne en circuit ouvert ou fermé et peut être alimentée en deux points, qui se trouvent en tête de chaque tronçon, ce qui nous donne le choix d'utiliser toute la hauteur de la colonne, ou sa moitié.

La circulation du liquide à travers toute la colonne est assurée à l'aide d'une pompe qui refoule des débits variant entre 5 et environ 260 l/h.

L'échantillonnage est assuré grâce au robinet de prélèvement placé en aval de la colonne d'absorption.

Les débits des différents fluides sont contrôlés par des débitmètres, qui ont été préalablement étalonnés (voir annexe 1).

En ce qui concerne l'alimentation de l'installation en CO_2 et en air, le dispositif est équipé d'un compresseur qui assure l'alimentation en air, quant au CO_2 , il provient d'une bouteille conçue spécialement pour les usages industriels. Cette dernière est munie d'un manodétendeur qui sert à contrôler le débit et la pression de sortie du CO_2 .

La colonne d'absorption est composée des parties suivantes :

- 1- Arrivée du gaz carbonique.
- 2- Débitmètre du CO_2 .
- 3- Arrivée d'air.
- 4- Débitmètre d'air.
- 5- Vanne de vidange du siphon.
- 6- Vanne de vidange de la colonne.
- 7- Garnissage.
- 8- Sortie du liquide de la colonne et prise d'échantillonnage.
- 9- Débitmètre du liquide.
- 10- Vanne d'alimentation du premier garnissage.
- 11- Vanne d'alimentation des deux garnissages.
- 12- Réservoir d'alimentation.
- 13- Pompe hydraulique.
- 14- Alimentation du liquide.
- 15- Sondes thermiques :

T_1 : Température de la phase gazeuse en bas de la colonne.

T_2 : Température de la phase liquide en sortie de la pompe.

T_3 : Température de la phase liquide en haut de la colonne.

T_4 : Température de la phase liquide en bas de la colonne.

16- Prises de pression :

P_1 : La pression en haut de la colonne (pression atmosphérique).

P_2 : La pression en bas de la colonne.

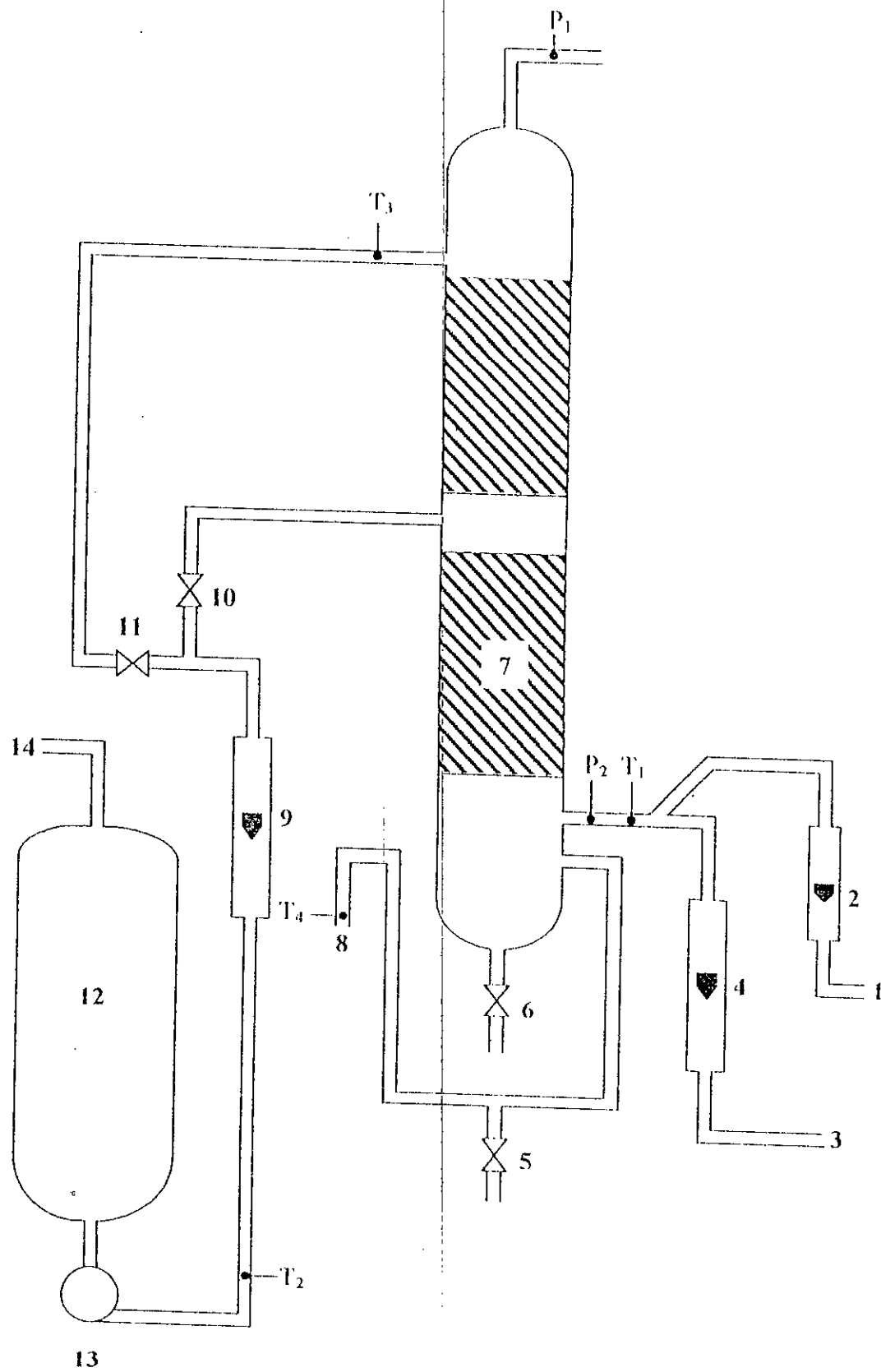


Figure IV.1. Schéma de la colonne à garnissage.

IV.2. Méthode d'analyse de la MEA

L'étude consiste à faire varier la concentration du CO₂ toute en fixant celle de la MEA et vice-versa (Voir annexe 2).

Les prélèvements des échantillons se font à partir d'un robinet de prélèvement en bas de la colonne à garnissage, toute les minutes pendant les cinq premières minutes et chaque trois minutes pour le reste de l'expérience, et ceci est valable pour tous les autres essais.

Chaque échantillon sera ensuite titré avec une solution 0,5 N d'HCl (Voir annexe 3) en présence d'un indicateur coloré, qui est la phénolphthaleine, pour déterminer la concentration de la MEA en sortie de la colonne en utilisant l'expression suivante :

$$N_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}} = N_{\text{MEA}} \cdot V_{\text{MEA}} \quad (\text{IV.1})$$

avec :

$N_{\text{MEA}}, N_{\text{HCl}}$: Normalité de la solution de MEA et d'HCl respectivement.

$V_{\text{MEA}}, V_{\text{HCl}}$: Volume de la solution de MEA et d'HCl respectivement (ml).

IV.3. Expression de calcul de la concentration expérimentale du CO₂ en sortie de la colonne d'absorption

La concentration expérimentale du CO₂ en sortie de colonne est déterminée à partir du bilan suivant :

D'après la stœchiométrie de la réaction, une mole de CO₂ réagit avec deux moles de MEA, d'où alors on peut écrire :

$$2 \varphi_{\text{CO}_2} = \varphi_{\text{MEA}}$$

En développant cette égalité, on trouve :

$$2G \cdot (C_{A(e)} - C_{A(s)}) = L \cdot (C_{B(e)} - C_{B(s)}) \quad (\text{IV.2})$$

Connaissant les débits liquide et de l'air, ainsi que les concentrations du CO_2 et de la MEA, nous pouvons estimer la concentration du CO_2 en sortie de la colonne à partir de l'expression suivante :

$$C_{A(s)} = C_{A(e)} - \frac{L}{2G} * (C_{B(e)} - C_{B(s)}) \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

φ_{CO_2} : Quantité du CO_2 consommée par la réaction (mol/m^3).

φ_{MEA} : Quantité de la MEA consommée par la réaction (mol/m^3).

$C_{A(e)}$: Concentration du CO_2 dans la phase gazeuse à l'entrée de la colonne (mol/m^3).

$C_{A(s)}$: Concentration du CO_2 dans la phase gazeuse en sortie de la colonne (mol/m^3).

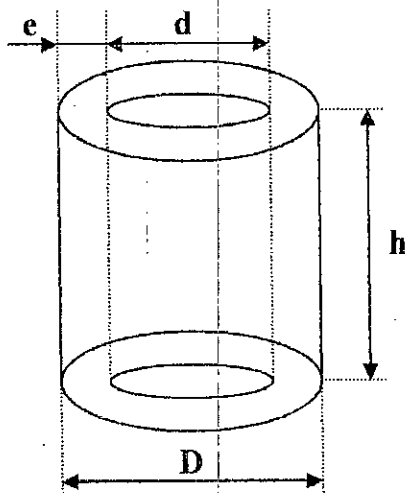
$C_{B(e)}$: Concentration de la MEA dans la phase liquide à l'entrée de la colonne (mol/m^3).

$C_{B(s)}$: Concentration de la MEA dans la phase liquide en sortie de la colonne (mol/m^3).

G, L : Débit volumique de l'air et de la phase liquide (m^3/s)

IV.4. Caractéristiques du garnissage

Le garnissage utilisé dans notre étude est du type d'Anneaux Raschig en PVC. Chaque anneau possède les dimensions suivantes :



Avec :

La hauteur : $h = 10,5 \text{ mm}$;

Le diamètre extérieur : $D = 10,5 \text{ mm}$;

Le diamètre intérieur : $d = 7,3 \text{ mm}$;

L'épaisseur : $e = 1,6 \text{ mm}$.

IV.4.1. Surface spécifique du grain

$$S_p = \frac{\text{surface du grain}}{\text{volume du grain}} = \frac{a_p}{V_p} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_p = \pi \cdot d \cdot h + \pi \cdot D \cdot h + 2 \left[\pi \left(\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4} \right) \right] = [\pi(D+d)] \left[h + \frac{(D-d)}{2} \right] \\ V_p = h \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) \end{array} \right. \quad (\text{IV.5})$$

(IV.6)

A.N :

$$a_p = 676,63 \text{ mm}^2 \quad \Rightarrow \quad S_p = 1,44 \text{ (mm}^2/\text{mm}^3) = 1,44 \cdot 10^3 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$$

$$V_p = 469,73 \text{ mm}^3$$

IV.4.2. Fraction du vide d'un grain

$$\varepsilon_g = \frac{\text{Volume du vide au sein du grain}}{\text{Volume total du grain}} = \frac{\text{Volume total du grain} - \text{Volume réel du grain}}{\text{Volume total du grain}} \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Le volume total du grain} = h \frac{\pi D^2}{4} = 10,5 \frac{\pi (10,5)^2}{4} = 909,19 \text{ mm}^3 \\ \text{Le volume réel du grain} = V_p = 469,73 \text{ mm}^3 \end{array} \right.$$

$$\text{A.N: } \varepsilon_g = \frac{909,19 - 469,73}{909,19} = 0,48.$$

IV.4.3. Diamètre équivalent du grain

Le diamètre équivalent du grain est le diamètre de la sphère qui a le même volume que le grain, donc :

$$V_P = \frac{\pi D_P^3}{6} \Rightarrow D_P = \left(\frac{6V_P}{\pi} \right)^{1/3} \quad (\text{IV.8})$$

$$\text{A.N: } D_P = \left(\frac{6 \times 469,73}{\pi} \right)^{1/3} = 9,64 \text{ mm} = 9,64 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

IV.4.4. Porosité du garnissage

$$\varepsilon_{\text{colonne}} = \frac{\text{Volume du vide au sein de la colonne}}{\text{Volume de la colonne}}$$

Pour calculer $\varepsilon_{\text{colonne}}$, on utilise les données suivantes :

- Le nombre d'Anneaux Raschig en PVC au sein de la colonne à garnissage étant :

$$n = 3859 \text{ Anneaux Raschig.}$$

- La hauteur garnie de la colonne: $Z = 1,26 \text{ m}$.
- Le diamètre intérieur de la colonne à garnissage: $D_{\text{colonne}} = 0,075 \text{ m}$.
- Le volume occupé par le garnissage au sein de la colonne :

$$V_0 = n \cdot V_P = 3859 \cdot 469,73 \cdot 10^{-9} = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Le volume de la colonne à garnissage.

$$V_1 = Z \frac{\pi D_{\text{colonne}}^2}{4} = 1,26 \frac{\pi (0,075)^2}{4} = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Le volume du vide au sein de la colonne: $V_2 = V_1 - V_0$.

Donc, l'expression de la porosité de la colonne s'écrira comme suit :

$$\varepsilon_{\text{colonne}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1 - V_0}{V_1} = 1 - \frac{V_0}{V_1}$$

$$\text{A.N : } \varepsilon_{\text{colonne}} = 1 - \frac{1,81 \cdot 10^{-3}}{5,56 \cdot 10^{-3}} = 0,67$$

IV.4.5. Aire géométrique du garnissage

$$A_p = \frac{\text{L'aire total du garnissage}}{\text{volume total de la colonne garnie}} = \frac{\text{nbre total des grains} \times \text{aire d'un grain}}{\text{volume total de la colonne garnie}}$$

$$\text{A.N : } A_p = \frac{2,61}{5,56 \cdot 10^{-3}} = 469,42 (\text{m}^2/\text{m}^3)$$

IV.5. Les résultats expérimentaux

Soit :

L : Débit volumique de la solution de MEA

Q_{CO_2} : Débit volumique de CO_2

Q_{air} : Débit volumique de l'air

$C_{B(e)}$: Concentration de la MEA à l'entrée de la colonne

$C_{B(s)}$: Concentration de la MEA en sortie de la colonne

$\Delta P_{\text{colonne}}$: Perte de charge dans la colonne

Les résultats des 20 essais sont résumés en **annexe 4**.

IV.5.1. Résultats obtenus à partir du dispositif pilote

Les différents résultats obtenus à partir du dispositif pilote montrent l'évolution des concentrations du CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne en fonction du temps (figures : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12).

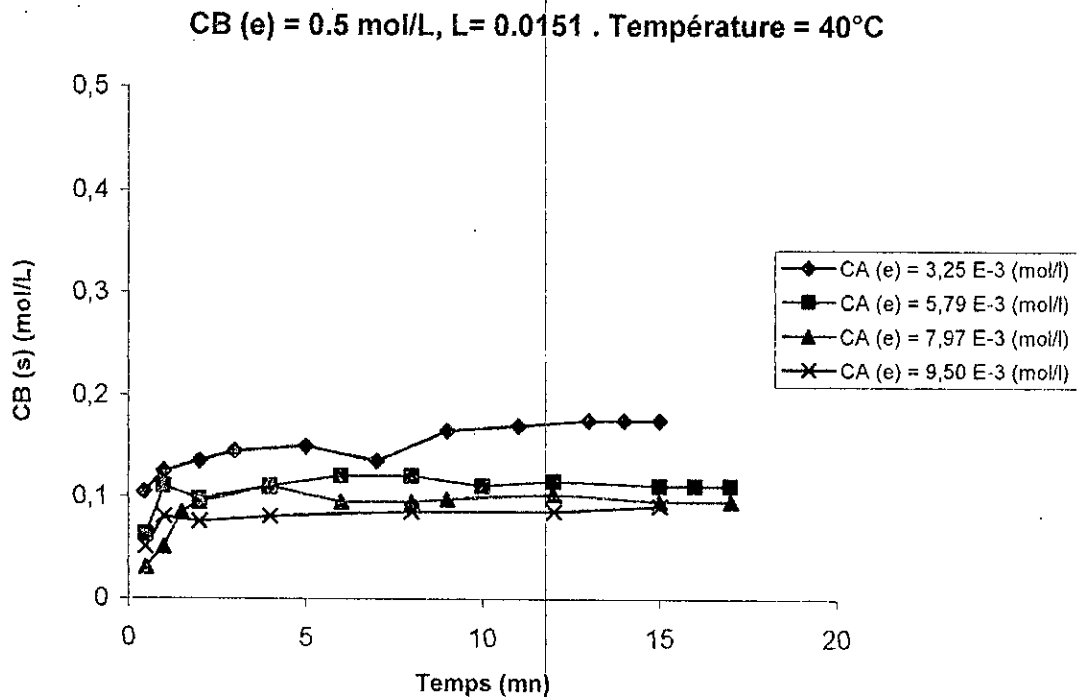


Figure IV.2. Evaluation expérimentale de la concentration de la MEA en sortie de la colonne en fonction du temps.

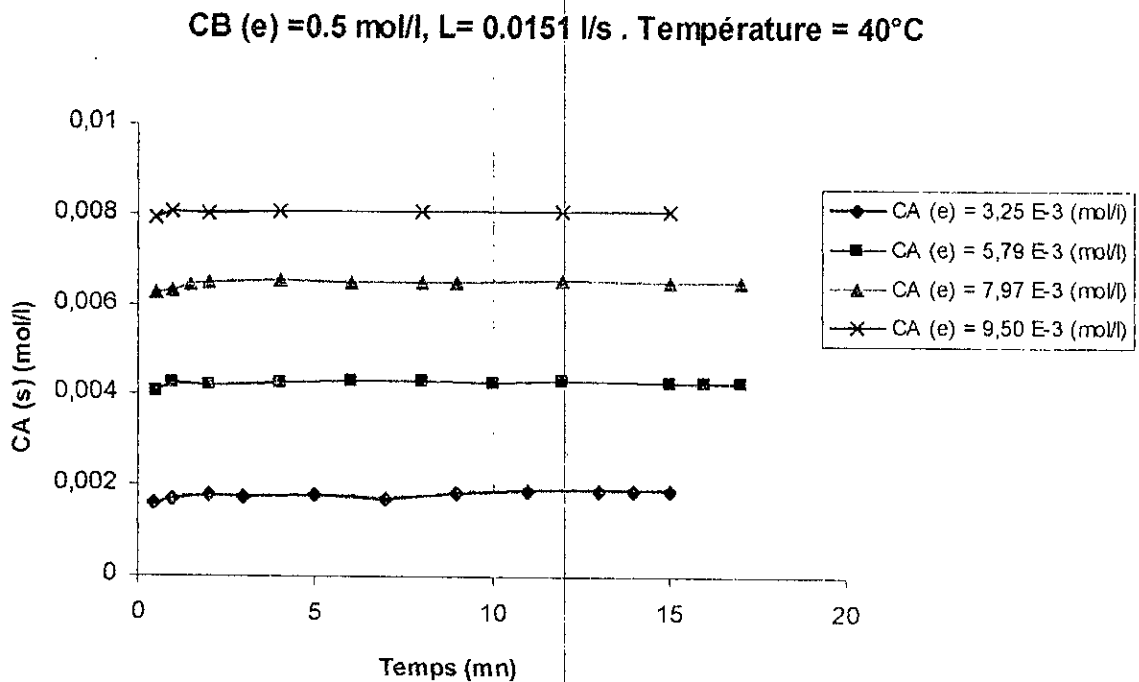


Figure IV.3. Evaluation expérimentale de la concentration du CO₂ en sortie de la colonne en fonction du temps.

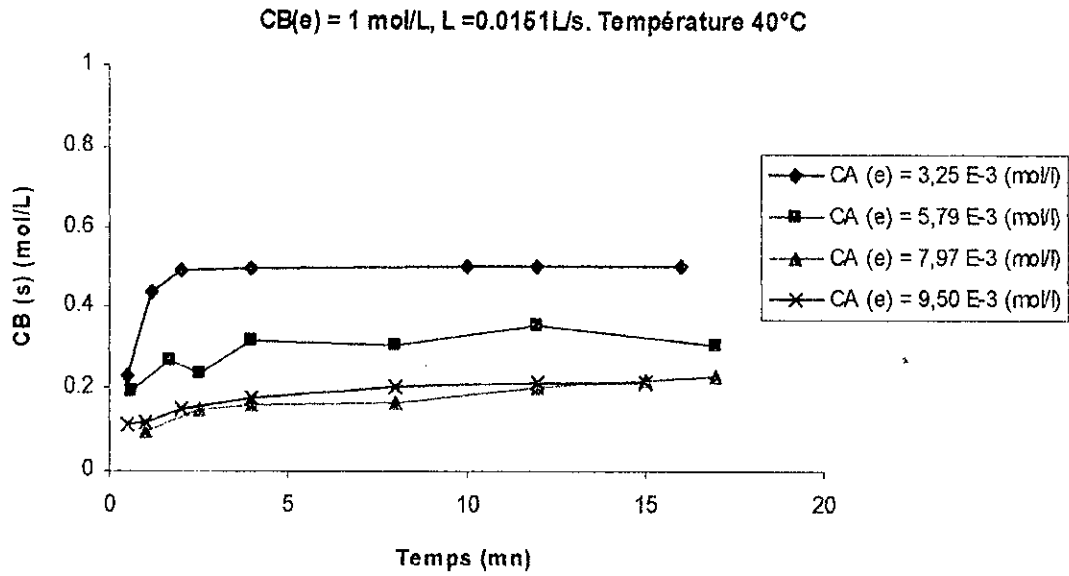


Figure IV.4. Evaluation expérimentale de la concentration de la MEA en sortie de la colonne en fonction du temps.

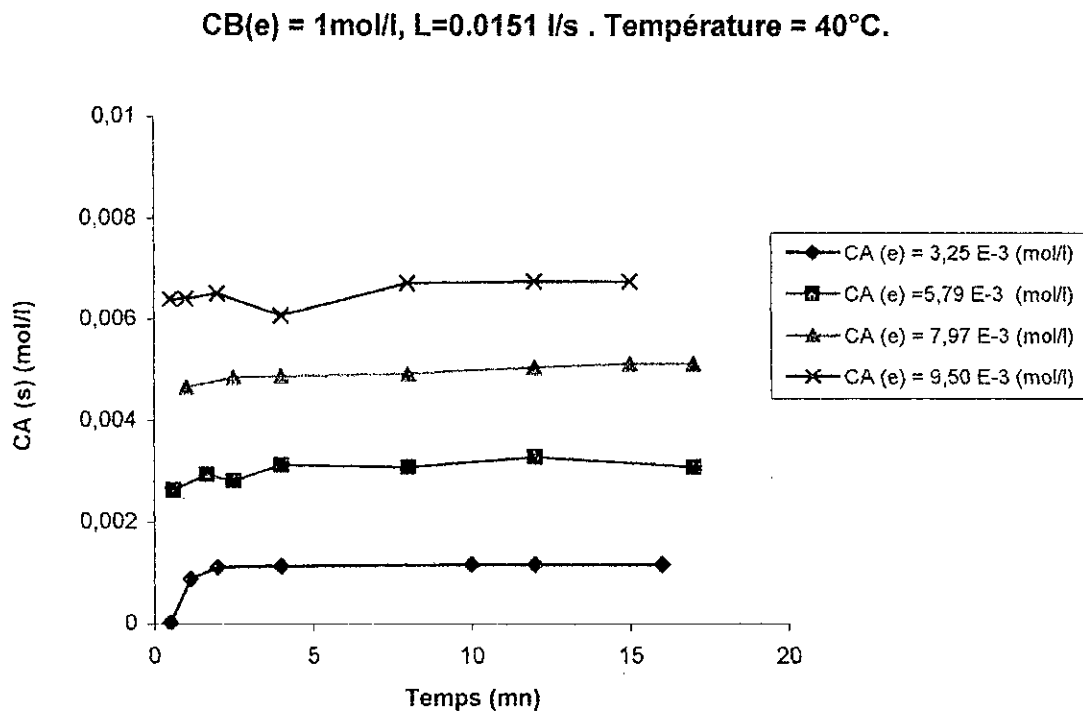


Figure IV.5. Evaluation expérimentale de la concentration du CO₂ en sortie de la colonne en fonction du temps.

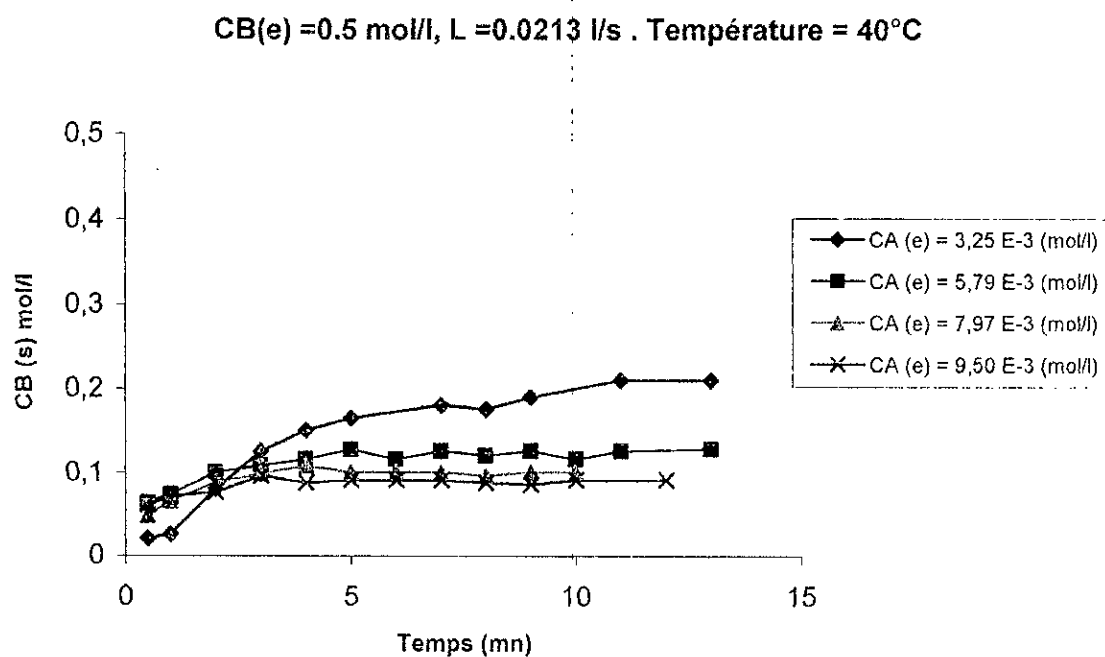


Figure IV.6. Evaluation expérimentale de la concentration de la MEA en sortie de la colonne en fonction du temps.

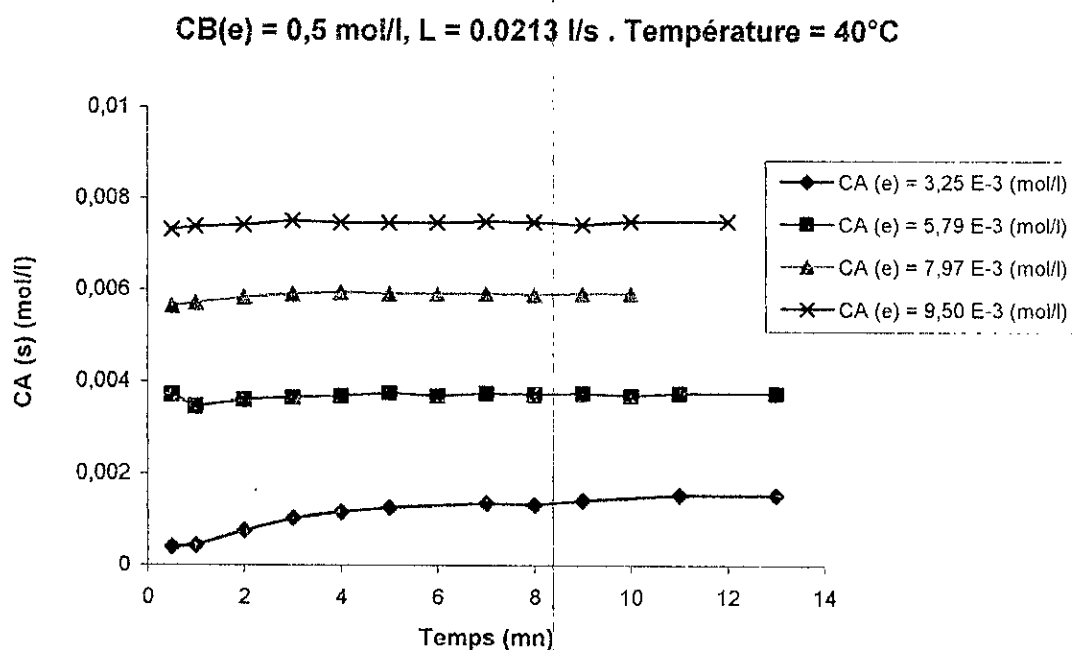


Figure IV.7. Evaluation expérimentale de la concentration du CO₂ en sortie de la colonne en fonction du temps.

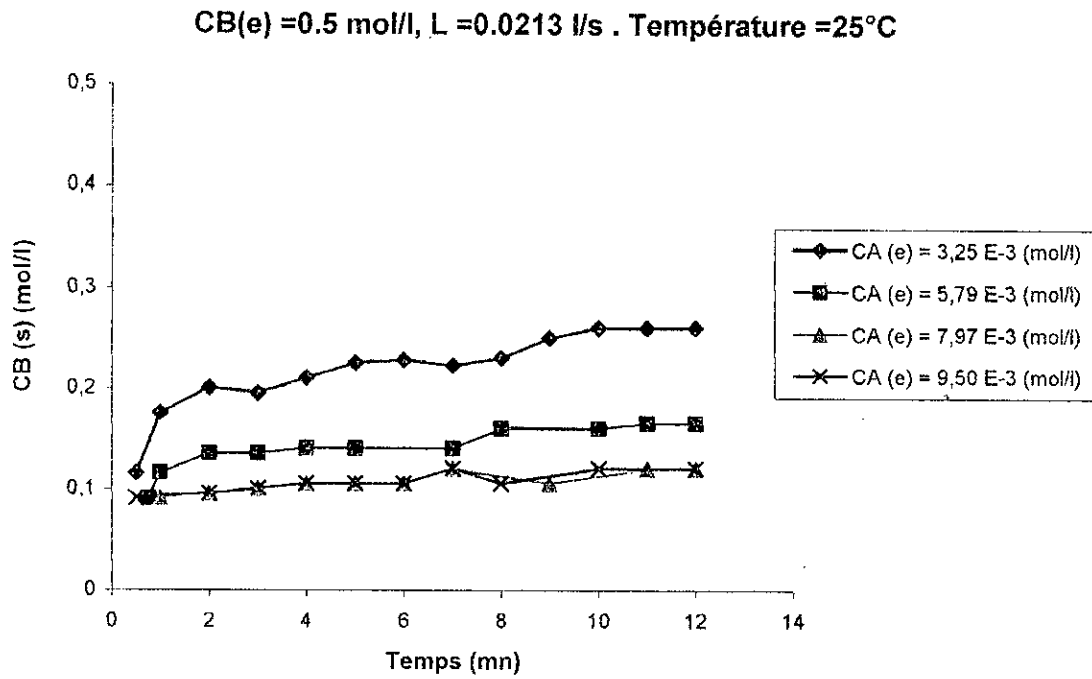


Figure IV.8. Evaluation expérimentale de la concentration de la MEA en sortie de la colonne en fonction du temps.

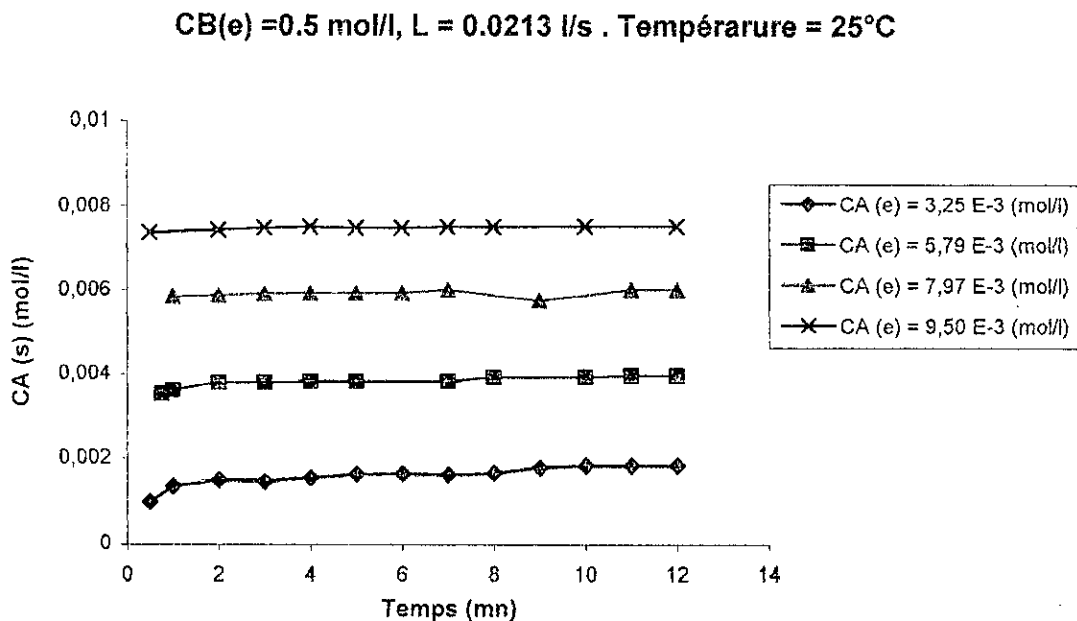


Figure IV.9. Evaluation expérimentale de la concentration du CO₂ en sortie de la colonne en fonction du temps.

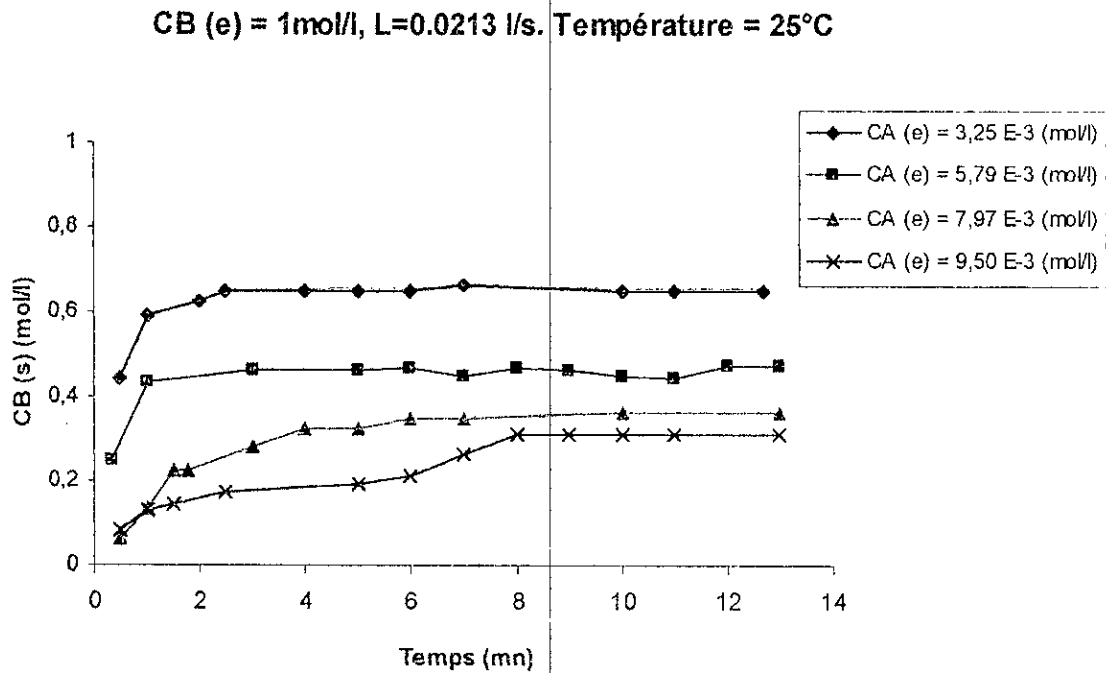


Figure IV.10. Evaluation expérimentale de la concentration de la MEA en sortie de la colonne en fonction du temps.

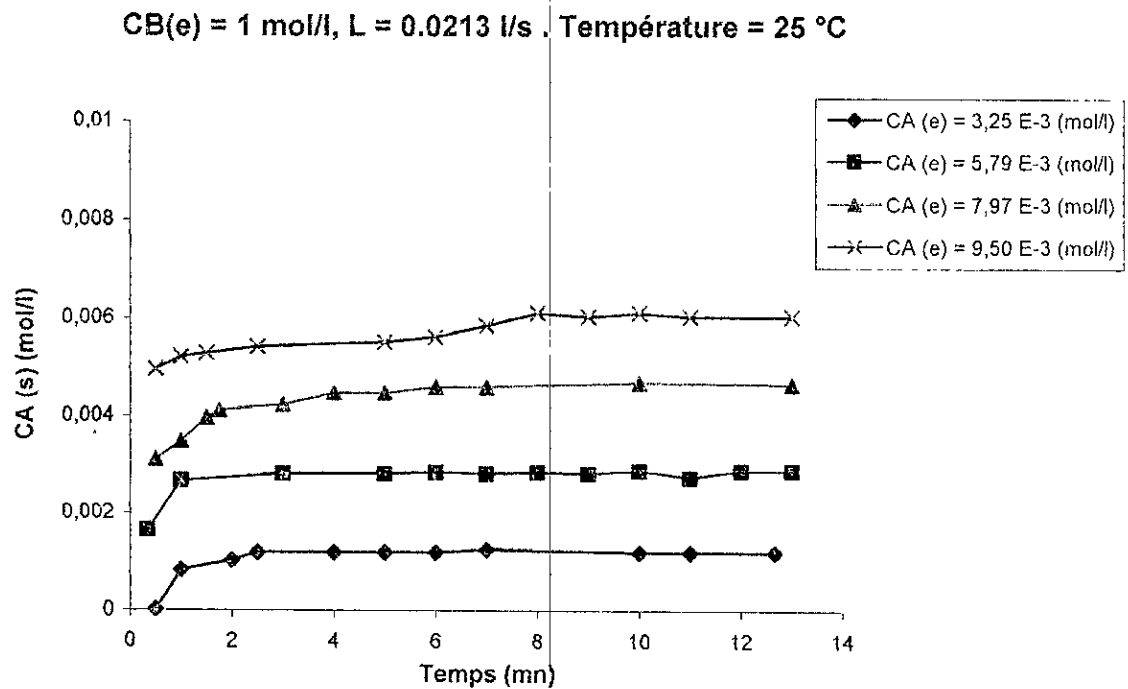


Figure IV.11. Evaluation expérimentale de la concentration du CO₂ en sortie de la colonne en fonction du temps.

IV.5.2. Interprétation des résultats

Chaque courbe présente deux zones distinctes ; une zone où il y a variation de la concentration de la MEA dans le sens croissant : *c'est le régime transitoire*, et une autre où la concentration de la MEA est pratiquement constante : *c'est le régime permanent*.

Lors du régime transitoire l'augmentation rapide de la concentration de la MEA est due à la dispersion non uniforme du liquide au sein du garnissage.

D'après les résultats présentés dans les figures ci - dessous, on constate que :

- Pour une concentration constante de la MEA à l'entrée de la colonne, à température constante et à débit constant de la solution aqueuse de la MEA, l'augmentation du débit du CO_2 à l'entrée de la colonne entraîne la diminution de la concentration de la MEA en sortie de la colonne.
- En maintenant le débit du CO_2 à l'entrée de la colonne, la température et le débit de la solution aqueuse de MEA constants, l'augmentation de la concentration de la MEA à l'entrée de la colonne entraîne une augmentation de la quantité de la MEA consommée par la réaction.
- En maintenant la concentration de la MEA à l'entrée de la colonne, le débit de la solution aqueuse de la MEA et le débit du CO_2 à l'entrée de la colonne constants nous remarquons que l'augmentation de la température entraîne une augmentation importante de la MEA consommée par la réaction. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la constante de vitesse de la réaction.
- En maintenant la concentration de la MEA à l'entrée de la colonne, la température et le débit du CO_2 à l'entrée de la colonne constants, nous constatons que lorsque l'on augmente le débit de la solution aqueuse de MEA, la quantité de la MEA qui réagit avec le CO_2 a tendance à diminuer

IV.6. Discussion des résultats obtenus expérimentalement et par simulation

Le modèle mathématique élaboré permet de prédire les concentrations de CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne avec des erreurs allant de 0,5 % à 8,5%.

L'estimation théorique des concentrations du CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne d'absorption a été faite en prenant les valeurs de l'aire interfaciale estimées à partir de la corrélation d'Onda et col [3]. Cette dernière corrélation est valable à 20 – 30 % près.

Nous constatons que les concentrations obtenues expérimentalement de la MEA et celles du CO_2 en sortie de la colonne sont en accord avec les résultats théoriques.

Les écarts entre les résultats de la simulation et ceux trouvés expérimentalement sont dus généralement aux différentes corrélations et hypothèses utilisées pour déterminer les paramètres physiques.

L'ensemble des résultats obtenus à partir du dispositif pilote et par simulation sont donnés dans le tableau IV.1.

essai	T(°C)	Débit D'air (m ³ /s) 10 ³	L (m ³ /s) 10 ³	Débit du CO ₂ (m ³ /s) 10 ⁴	a (m ² /m ³)	C _{B(e)} (mol/l)	C _{B(s)} (EXP) (mol/l)	C _{B(s)} (Modèle) (mol/l)	Erreur sur la MEA %	C _{A(e)} (mol/l) 10 ³	C _{A(s)} EXP (mol/l) 10 ³	C _{A(s)} Modèle (mol/l) 10 ³	Erreur sur le CO ₂ %
1	40	1,6528	0,0151	1,4287	135,5	0,5	0,175	0,178	1,71	3,25	1,88	1,89	0,53
2	40	1,6528	0,0151	2,7273	135,5	0,5	0,110	0,112	1,18	5,79	4,26	4,23	0,70
3	40	1,6528	0,0151	4	135,5	0,5	0,095	0,093	2,10	7,97	6,48	6,41	1,08
4	40	1,6528	0,0151	5	135,5	0,5	0,085	0,086	1,17	9,50	8,08	7,97	1,11
5	40	1,6528	0,0151	1,4287	135,5	1	0,500	0,520	4,00	3,25	1,15	1,18	2,60
6	40	1,6528	0,0151	2,7273	135,5	1	0,310	0,320	3,32	5,79	3,06	2,91	4,90
7	40	1,6528	0,0151	4	135,5	1	0,230	0,240	4,34	7,97	5,10	4,82	5,49
8	40	1,6528	0,0151	5	135,5	1	0,213	0,223	4,69	9,50	6,73	6,31	6,24
9	40	1,6528	0,0213	1,4287	151,9	0,5	0,210	0,221	5,23	3,25	1,53	1,45	5,22
10	40	1,6528	0,0213	2,7273	151,9	0,5	0,127	0,133	4,31	5,79	3,73	3,64	2,41
11	40	1,6528	0,0213	4	151,9	0,5	0,100	0,104	4,00	7,97	5,89	5,72	2,88
12	40	1,6528	0,0213	5	151,9	0,5	0,090	0,093	3,33	9,50	7,47	7,24	3,07
13	25	1,6528	0,0213	1,4287	151,9	0,5	0,260	0,265	1,92	3,25	1,82	1,75	3,84
14	25	1,6528	0,0213	2,7273	151,9	0,5	0,165	0,170	3,03	5,79	3,93	3,87	1,52
15	25	1,6528	0,0213	4	151,9	0,5	0,120	0,128	4,00	7,97	5,99	5,87	2,00
16	25	1,6528	0,0213	5	151,9	0,5	0,097	0,101	4,12	9,50	7,50	7,35	2,00
17	25	1,6528	0,0213	1,4287	151,9	1	0,650	0,680	4,61	3,25	1,17	1,15	1,71
18	25	1,6528	0,0213	2,7273	151,9	1	0,470	0,490	4,25	5,79	2,86	2,73	4,54
19	25	1,6528	0,0213	4	151,9	1	0,360	0,380	5,55	7,97	4,64	4,28	7,75
20	25	1,6528	0,0213	5	151,9	1	0,308	0,326	5,84	9,50	6,03	5,52	8,45

Tableau IV.1. Valeurs des concentrations expérimentales et théoriques de la MEA et du CO₂ en sortie de la colonne.

IV.7. CONCLUSION

L'étude expérimentale nous a permis de constater que les résultats trouvés à l'échelle pilote sont en accord avec les résultats trouvés à partir du modèle. On constate aussi que la capacité d'absorption du CO_2 par une solution aqueuse de la MEA dépend fortement des conditions opératoires à savoir la concentration du CO_2 et de la MEA à l'entrée de la colonne, ainsi que du débit liquide et de la température.

De plus, nous avons utilisé les équations du modèle ainsi que les valeurs de l'aire interfaciale obtenues à partir de la corrélation de Onda [3] pour estimer les concentrations du CO_2 et de la MEA en sortie de la colonne d'absorption.

Les valeurs des concentrations en sortie de la colonne obtenues à partir du modèle ont un écart variant entre 1 à 6 % pour la MEA et de 0,5 à 8 % pour le CO_2 par rapport à celles trouvées expérimentalement, ce qui nous a permis de valider notre modèle théorique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] J.R. Welty ; C.E. Wicks ; R.E. Wilson, 1984.
Fundamentals of Momentum, Heat and mass transfer.
Ed. Wiley and Sons.

- [2] P. Trambouze, H. Vanlandeghen, J.P. Wauquier, 1984.
Les réacteurs chimiques, conception / calcul / mise en œuvre,
Ed, Technip.

- [3] K. Onda, H. Takeuchi, Y. Okumoto, 1968.
Mass transfer coefficients between gaz and liquid phases in packed column,
J.Chem. Engng. Japan, 1(1), p 56-61.

- [4] S.S. Puranik, A. Vogelpohl, 1974.
Chem.Eng. Sci., 1, p. 58

- [5] P.V. Danckwerts, 1970.
Gas – Liquid Reaction.
Mc Graw Hill, Londres.

- [6] M.K. Kishinivskii, 1979
Theor, fund, chem.Eng, 4, p. 641

- [7] P. Tontiwachwuthikul, P. Meisen, A. Lim, 1992.
CO₂ absorption by NaOH, MEA and AMP solution in packed column,
Chem.Eng. Sci, 47(2), p. 381 – 390.

- [8] T. Pintola, P. Tontiwachwuthikul, P. Meisen, 1993.
Simulation of pilot plant and industrial CO₂ – MEA absorbers,
Gas separation and purification, 7 (1), p. 47 – 52.

- [9] G.P. Escobillana, J.A.Saez, J.R.Perez- Correa, H.T. Neuburg, 1991.
Behaviour of absorption /stripping columns for CO₂ – MEA system : modelling
and experiments,
The Can.J.Chem.Eng, 69, p. 969 – 977.
- [10] P.M.M.Blauwhoff, G.F.Versteeg, W.P.M. Van Swaaij, 1983.
A study on the reaction between CO₂ and alkanolamines in aqueous solutions,
Chem. Engng. Sci, 38 (9), p.1411 – 1429.
- [11] P.Trambouze, H.Vanlandeghen, J.P. Wauquier, 1984.
Les réacteurs chimiques, conception / calcul / mise en œuvre,
Ed, Technip, P 218
- [12] J.J. Caroll, J.D. Slupoky, A.E. Mather, 1991.
The solubility of carbon dioxide in water at low pressure,
J.Phys. Chem. Ref. Data, 20, 6.
- [13] D.P.Hagewiesche, S.S.Achour, H.A. El – ghawas, O.C. Saudall, 1995.
Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of monethanolamine and N-
methyldiethanolamine,
Chem. Eng. Sci, 50(7), p. 1071 – 1079.
- [14] M.Dellah, 2002.
Modélisation et simulation de l'absorption du CO₂ par de la MEA dans une
colonne à garnissage,
Thèse de magister, ENP.
- [15] M^f .S.Kardache, M^f .R. Benarab 2002.
Etude expérimentale et modélisation de l'absorption dans une colonne à
garnissage du système (air-CO₂, MEA)
Mémoire Ingénieur, ENP.

Annexe

ANNEXE 1**Les courbes d'étalonnage****1. Etalonnage du débit mètre d'eau:**

L'étalonnage du débitmètre d'eau s'effectue d'une manière classique qui consiste à noter le volume "V" sortant du bac pendant un temps "t", pour chaque position du flotteur et calculer ensuite le débit d'eau correspondant:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant [15]

position	1 ^{er} essai			2 ^{eme} essai			Débit moyen(l/s)
	V ₁ (l)	T ₁ (s)	Q ₁ (l/s)	V ₂ (l)	T ₂ (s)	Q ₂ (l/s)	
15	1	81.0	0.0123	2	167.0	0.0120	0.0122
20	1	67.0	0.0149	2	131.0	0.0152	0.0151
30	1	46.0	0.0217	2	96.0	0.0208	0.0213
40	1	33.5	0.0298	2	71.0	0.0282	0.0290
50	1	30.0	0.0334	2	59.5	0.0336	0.0335
60	1	24.5	0.0408	2	49.0	0.0408	0.0408
70	1	21.0	0.0476	2	42.0	0.0476	0.0476
80	1	17.0	0.0588	2	36.0	0.0555	0.0572
90	1	16.0	0.0625	2	33.0	0.0606	0.0616
100	1	14.0	0.0714	2	28.5	0.0702	0.0708

2. Etalonnage du débitmètre d'air [15]

L'étalonnage du débitmètre d'air se fait à l'aide d'un débitmètre de référence (débitmètre à bille) étalonné préalablement par le constructeur.

L'opération consiste à mettre ce dernier en série avec le débitmètre à air (rotamètre), et de noter pour chaque position de la bille la position correspondante du rotamètre, d'où l'on peut tirer la valeur réelle du débit d'air à l'aide de la courbe donnée par le constructeur.

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous:

position de la bille	position du flotteur	données du constructeur (Q_1 (l/h))	$Q \cdot 10^3$ (m^3/s)
1	3	1000	0,2778
2	9	1600	0,4444
3	18	2200	0,6111
4	24	2800	0,7778
5	33	3550	0,9861
6	42	4300	1,1944
7	50	5200	1,4444
8	57	5950	1,6528
9	67	6850	1,9028
10	75	8000	2,2222

3. Etalonnage du débitmètre du CO₂ [15]

L'étalonnage du débit mètre du CO₂ s'effectue de la même manière que celui de l'eau ; sauf que dans ce cas, on note le volume 'V' du gaz qui passe à travers le compteur pendant un temps 't' donné, tout en tenant compte des variations de température et de pression à l'entrée de la colonne.

On a:

$P.V = n.R.T$, en divisant les deux cotés de l'équation par le temps "t",
on obtient:

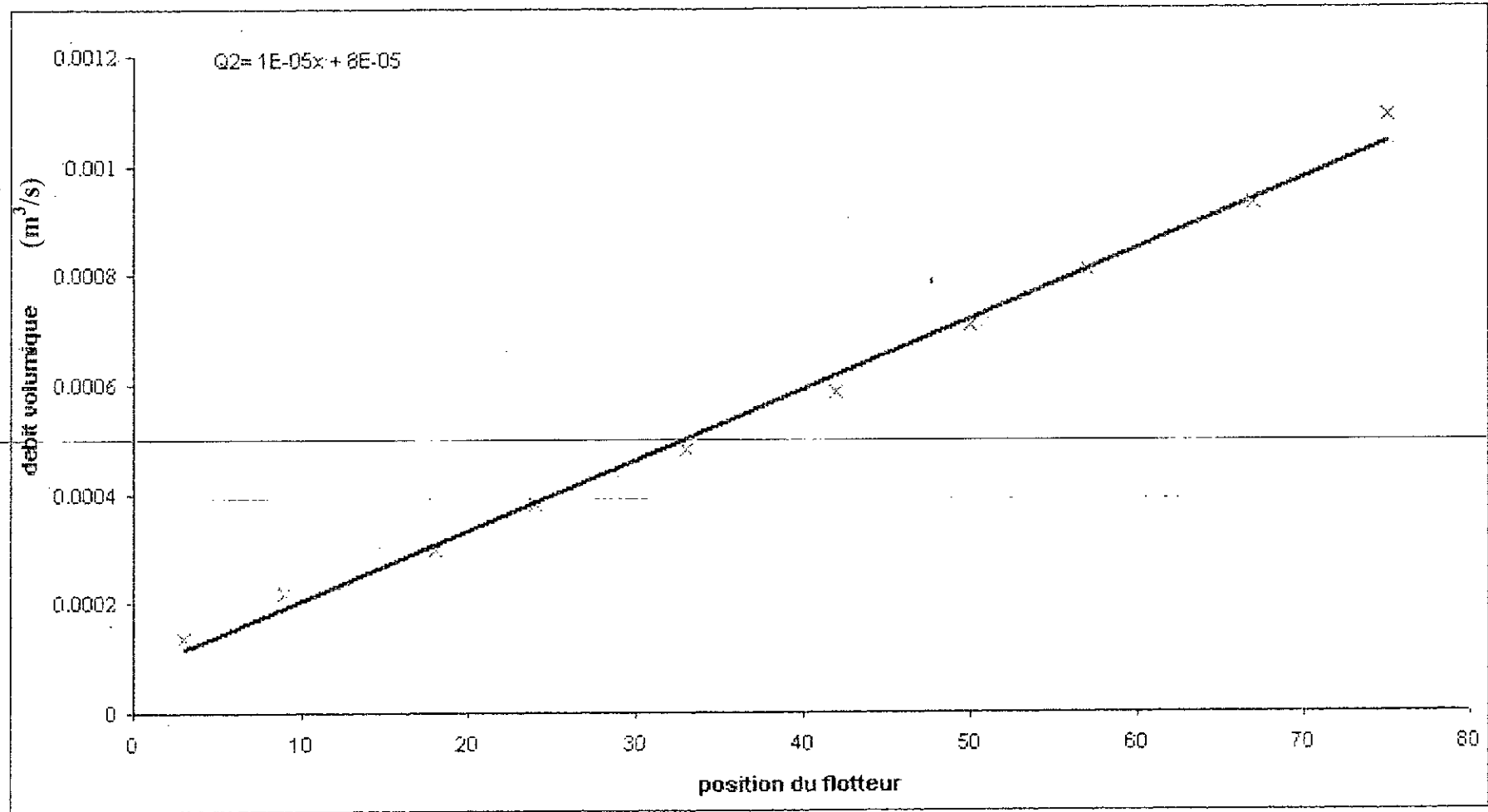
$$P.Q = F.R.T \dots (*)$$

Sachant que le débit volumique "Q" est calculé par la formule $Q = \frac{V}{t}$;

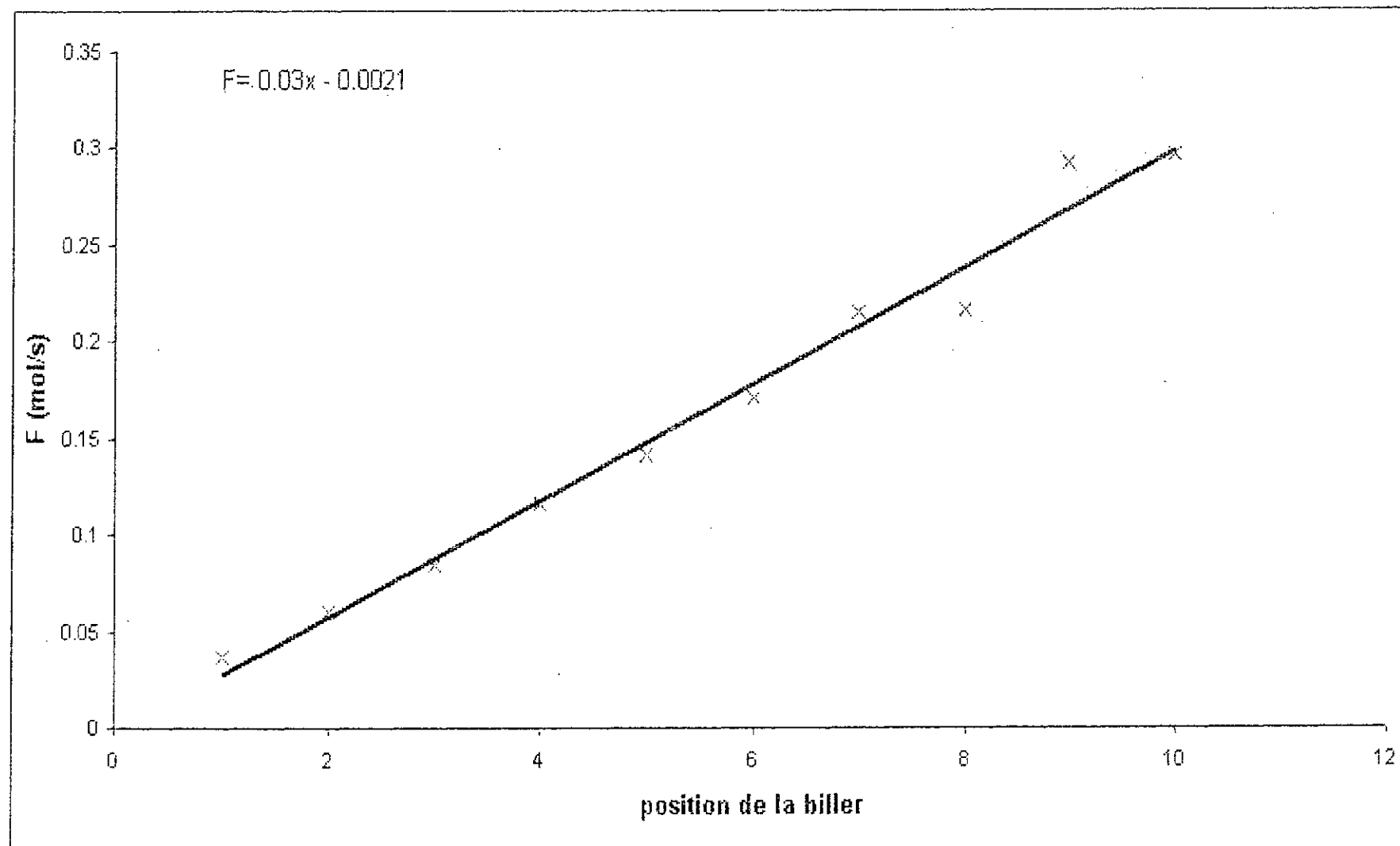
on pourra alors déterminer le débit molaire "F", à partir de l'équation (*).

Les valeurs des différents paramètres notés et calculés sont indiquées dans le tableau suivant :

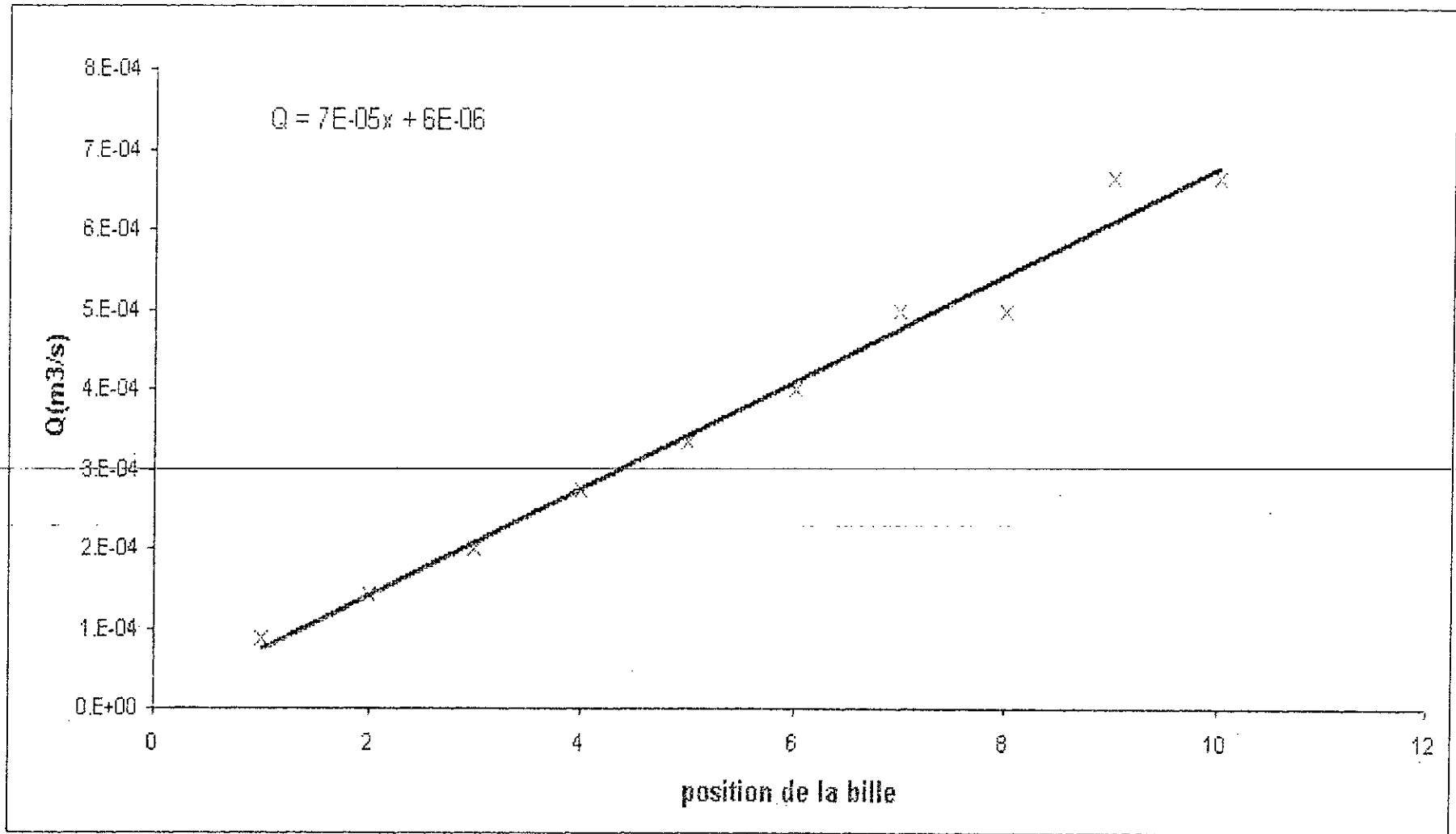
Positon	P (atm)	Température (K)	V (m ³)	Temps (s)	Q*10 ⁴ (m ³ /s)	F (mol/s)
1	1	298	0,001	11,5	0,8696	0,004179
2	1	298	0,002	14	1,4287	0,005846
3	1	298	0,002	10	2,0000	0,008184
4	1	298	0,003	11	2,7273	0,011160
5	1	298	0,003	9	3,3333	0,013639
6	1	298	0,002	5	4,0000	0,016368
7	1	298	0,002	4	5,0000	0,020460
8	1	298	0,003	6	5,0000	0,020460
9	1	298	0,002	3	6,6667	0,027280
10	1	298	0,002	3	6,6667	0,027280



Courbe d'étalonnage du débitmètre d'air



Etalonnage du débitmètre molaire du CO_2



Etalonnage du débitmètre volumique du CO₂

ANNEXE 2**Préparation d'une solution 0,5 N d'HCl**

Nous disposons d'une solution de HCl dont la pureté est de 37 % en masse (la solution mère); pour déterminer le volume de la solution à prélever et correspondant à 0,5 mole, on suit le raisonnement suivant :

On a :

$$\begin{cases} m = n.M & (1) \\ m = P.d.V & (2) \end{cases}$$

avec :

P : pureté de HCl

m : masse de HCl (g)

M : masse molaire de HCl (g/mol)

d : densité de la solution de HCl (g/cm³)

V : volume de la solution de HCl (cm³)

D'où alors, on peut déterminer le volume, en combinant les équations (1) et (2) :

$$V_{\text{solution mère}} = \frac{n.M}{P.d}$$

avec :

$$n = 0,5 \text{ mol/l}$$

$$M = 36,46 \text{ g/mol}$$

$$P = 0,37$$

$$d = 1,184 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{A.N} \quad V_{\text{solution mère}} = \frac{0,5 \cdot 36,5}{0,37 \cdot 1,184} = 41,67 \text{ cm}^3.$$

Pour obtenir la solution « 0,5 N » d'HCl, on complète le volume prélevé de la solution mère jusqu'à un litre.

ANNEXE 3**Préparation de la solution de MEA**

a) $C_{\text{MEA}} = 0,5 \text{ mol/l}$:

Pour réaliser nos expériences, on a eu besoin de 20L d'une solution aqueuse de MEA, pour chaque essai.

Pour une solution aqueuse 0,5 N, le nombre de moles correspondant à un volume de 20l est de 10 moles.

$$\left. \begin{array}{l} 0,5 \text{ mole} \longrightarrow 1 \text{ litre.} \\ X \text{ moles} \longrightarrow 20 \text{ litres.} \end{array} \right\} \implies X = n_{\text{MEA}} = 10 \text{ moles.}$$

Sachant la masse molaire de la MEA, on pourra donc déterminer la masse correspondante, ce qui nous permet ensuite d'estimer le volume de la solution mère à prendre, dont la pureté est de 98 %.

$$\begin{cases} m_{\text{MEA}} = n_{\text{MEA}} * M_{\text{MEA}}. \\ m_{\text{MEA}} = 0,98 * m_{\text{solution mère}} = 0,98 * (\rho_{\text{solution mère}} * V_{\text{solution mère}}). \end{cases}$$

D'où alors : $V_{\text{solution mère}} = \frac{n_{\text{MEA}} * M_{\text{MEA}}}{0,98 * \rho_{\text{solution mère}}}$

Avec :

$$\begin{cases} n_{\text{MEA}} = 10 \text{ moles.} \\ M_{\text{MEA}} = 61,08 \text{ g/mol.} \\ \rho_{\text{solution mère}} = 1,016 \text{ g/cm}^3. \end{cases}$$

A.N : $V_{\text{solution mère}} = 613,4 \text{ cm}^3 = 0,6134 \text{ L.}$

b) $C_{\text{MEA}} = 1 \text{ mol/l}$:

De la même manière que précédemment, on recalcule le volume nécessaire pour la préparation d'une solution 1N :

$$V_{\text{solution mère}} = \frac{n_{\text{MEA}} * M_{\text{MEA}}}{0,98 * \rho_{\text{solution mère}}}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{\text{MEA}} = 20 \text{ moles.} \\ M_{\text{MEA}} = 61,08 \text{ g/mol.} \\ \rho_{\text{solution mère}} = 1,016 \text{ g/cm}^3. \end{array} \right.$$

A.N : $V_{\text{solution mère}} = 1226,9 \text{ cm}^3 = 1,2269 \text{ l.}$

Pour avoir les solutions désirées, on complète à chaque fois le volume prélevé de la solution mère jusqu'à 20 litres.

ANNEXE 4

Evolution de la concentration de la MEA et du CO₂ en fonction du temps réalisés à une température de 40°C :

a) Essai N°1 :

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole /l.}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (position 20).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 4- 5 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,4287 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 2).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0.45	1	2	3	5	17	9	11	13	14	15
V _{HCl} (ml)	2,1	2,5	2,7	2,9	3	2,7	3,3	3,4	3,5	3,5	3,5
C _{MEA} (mol/l)	0,105	0,125	0,135	0,145	0,15	0,135	0,165	0,17	0,175	0,175	0,175
C _{CO₂} (mol/l) · 10 ³	1,58	1,67	1,71	1,75	1,77	1,711	1,84	1,86	1,88	1,89	1,89

b) Essai N°2 :

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole /l.}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (position 20).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 3,5 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 2,7273 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 4).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0.5	1	2	4	6	8	10	12	15	16	17
V _{HCl} (ml)	1,25	2,2	1,95	2,2	2,4	2,4	2,2	2,3	2,2	2,2	2,2
C _{MEA} (mol/l)	0,062	0,11	0,0975	0,11	0,12	0,12	0,11	0,115	0,11	0,11	0,11
C _{CO₂} (mol/l) · 10 ³	4,07	4,26	4,21	4,26	4,30	4,30	4,26	4,48	4,28	4,26	4,26

c) Essai N° 3:

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 6).}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 20).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 3-4 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	1,5	2	4	6	8	9	12	15	17
V _{HCl} (ml)	0,6	1	1,7	1,9	2,2	1,9	1,9	1,95	2,05	1,9	1,9
C _{MEA} (mol/l)	0,03	0,05	0,085	0,095	0,11	0,095	0,095	0,0975	0,1025	0,095	0,095
C _{CO2} (mol/l) 10 ³	6,41	6,31	6,44	6,48	6,53	6,48	6,48	6,49	6,51	6,48	6,48

d) Essai N°4 :

$$C_{B(e)} = 0,501 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 8).}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 20).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 4.5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	2	4	8	12	15
V _{HCl} (ml)	1	1,6	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8
C _{MEA} (mol/l)	0,05	0,08	0,075	0,08	0,085	0,085	0,09
C _{CO2} (mol/l) 10 ³	7,92	8,02	8,006	8,023	8,04	8,04	8,058

e) Essai N°5:

$$C_{B(e)} = 1 \text{ mole/l.}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 20).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 4 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,4287 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s (position 2).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0,5	1,15	2	4	10	12	16
V _{HCl} (ml)	4,6	8,65	9,75	9,85	10	10	10
C _{MEA} (mol/l)	0,23	0,4325	0,4875	0,4925	0,5	0,5	0,5
C _{CO2} (mol/l) 10 ³	0,011	0,860	1,095	1,116	1,147	1,147	1,2147

f) Essai N°6:

$$C_{B(e)} = 1 \text{ mole/l.}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 20).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 3,8- 4,3 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 2,7273 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 4).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0,6	1,67	2,5	4	8	12	17
V _{HCl} (ml)	3,8	5,3	4,7	6,3	6,1	7,1	6,1
C _{MEA} (mol/l)	0,19	0,265	0,235	0,315	0,305	0,355	0,305
C _{CO2} (mol/l) 10 ³	2,61	3,91	2,79	3,10	3,06	3,26	3,06

g) Essai N°7 :

$$C_{B(e)} = 0.1 \text{ mole/l.}$$

$$L = 0,0151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (position 20).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 4-5 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s.} \text{ (position 6).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	1	2,5	4	8	12	15	17
V_{HCl} (ml)	1,9	2,9	3,1	3,3	4	4,3	4,6
C_{MEA} (mol/l)	0,095	0,145	0,155	0,165	0,2	0,2	0,215
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	4,64	5,82	5,86	5,90	5,03	5,10	5,10

h) Essai N°8 :

$$C_{B(e)} = 1 \text{ mole/l.}$$

$$L = 0,0151 \text{ l/s (position 20).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 4.5-5 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s.} \text{ (position 8).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0,5	1	2	4	8	12	15
V_{HCl} (ml)	2,2	2,3	2,9	3,5	4	4,26	4,26
C_{MEA} (mol/l)	0,11	0,1625	0,145	0,175	0,2	0,213	0,213
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	6,38	6,40	6,50	6,60	6,70	6,73	6,73

i) Essai N°9 :

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 1,4287 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 2).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 4.8 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	2	3	4	5	7	8	9	11	13
V_{HCl} (ml)	0,4	0,5	1,6	2,5	3	3,3	3,6	3,5	3,8	4,2	4,2
C_{MEA} (mol/l)	0,02	0,025	0,08	0,125	0,15	0,165	0,182	0,175	0,17	0,17	0,175
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	0,40	0,43	0,76	1,02	1,17	1,26	1,35	1,32	1,41	1,53	1,53

j) Essai N°10 :

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 2,7273 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 4).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
V_{HCl} (ml)	1,25	1,45	2	2,15	2,3	2,55	2,3	2,5	2,4	2,5	2,3	2,5	2,55
C_{MEA} (mol/l)	0,062	0,072	0,1	0,107	0,115	0,127	0,115	0,125	0,12	0,125	0,115	0,125	0,127
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	3,37	3,42	3,58	3,62	3,66	3,73	3,66	3,71	3,69	3,71	3,66	3,71	3,73

k) Essai N°11 :

$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$

$Q_{CO_2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 6).}$

$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$

$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$

$\Delta P_{\text{colonne}} = 5 \text{ cm d'eau.}$

Temps (mn)	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{HCl} (ml)	0,95	1,3	1,75	1,95	2,15	2	2	2	1,9	2	2
C_{MFA} (mol/l)	0,047	0,065	0,087	0,097	0,107	0,1	0,1	0,1	0,095	0,1	0,1
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	5,62	5,71	5,83	6,22	5,88	5,93	5,89	5,89	5,87	5,89	5,89

l) Essai N°12 :

$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$

$Q_{CO_2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 8).}$

$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$

$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$

$\Delta P_{\text{colonne}} = 5,2 \text{ cm d'eau.}$

Temps (mn)	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
V_{HCl} (ml)	1,2	1,4	1,5	1,9	1,75	1,8	1,8	1,8	1,75	1,7	1,8	1,8
C_{MFA} (mol/l)	0,06	0,07	0,075	0,095	0,087	0,09	0,09	0,09	0,087	0,085	0,09	0,09
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	7,32	7,37	7,39	7,49	7,46	7,47	7,46	7,47	7,46	7,44	7,47	7,47

**Evolution des concentrations de la MEA et du CO₂ en fonction du temps
réalisé à la température ambiante (25°C)**

m) Essai N°13 :

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 1,4287 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 2).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 4.5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V _{HCl} (ml)	2,3	3,5	4	3,9	4,2	4,5	4,55	4,45	4,6	5	5,2	5,2	5,2
C _{MEA} (mol/l)	0,115	0,175	0,2	0,195	0,21	0,225	0,227	0,222	0,23	0,25	0,26	0,26	0,26
C _{CO₂} (mol/l) 10 ³	0,96	1,32	1,47	1,44	1,53	1,62	1,63	1,60	1,64	1,77	1,82	1,82	1,82

n) Essai N°14 :

$$C_{B(e)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 2,7273 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 4).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 4.5-5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,75	1	2	3	4	5	7	8	10	11	12
V _{HCl} (ml)	1,8	2,3	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	3,2	3,2	3,3	3,3
C _{MEA} (mol/l)	0,09	0,115	0,135	0,135	0,14	0,14	0,14	0,16	0,16	0,165	0,165
C _{CO₂} (mol/l) 10 ³	3,52	3,66	3,77	3,77	3,80	3,80	3,80	3,90	3,90	3,93	3,93

o) Essai N°15 :

$$C_{B(c)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 6).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 5,5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	1	2	3	4	5	6	7	9	11	12
V_{HCl} (ml)	1,8	1,9	2	2,1	2,1	2,1	2,4	2,1	2,4	2,4
C_{MEA} (mol/l)	0,09	0,095	0,1	0,105	0,105	0,105	0,12	0,105	0,12	0,12
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	5,84	4,87	5,90	5,92	5,92	5,92	5,99	5,74	5,99	5,99

p) Essai N°16 :

$$C_{B(c)} = 0,5 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 8).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	2	3	4	5	6	7	8	10	12
V_{HCl} (ml)	1,3	1,55	1,75	1,9	1,75	1,75	1,9	1,9	1,95	1,9,5
C_{MEA} (mol/l)	0,065	0,077	0,087	0,095	0,087	0,087	0,095	0,095	0,097	0,097
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	7,35	7,41	7,46	7,49	7,46	7,46	7,49	7,49	7,50	7,50

q) Essai N°17 :

$$C_{B(e)} = 1 \text{ mole /l.}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (position 30).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 4 - 5 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 1,4287 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 2).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0,5	1	2	2,5	4	5	6	7	10	11	12,67
V _{HCl} (ml)	9,1	11,8	12,5	13	13	13	13	13,2	13	13	13
C _{MEA} (mol/l)	0,445	0,59	0,625	0,65	0,65	0,65	0,65	0,66	0,65	0,65	0,65
C _{CO₂} (mol/l) 10 ³	0,01	0,82	1,02	1,17	1,17	1,17	1,27	1,23	1,17	1,17	1,17

r) Essai N°18 :

$$C_{B(e)} = 1 \text{ mole /l.}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (position 30).}$$

$$\Delta P_{\text{colonne}} = 4 - 5 \text{ cm d'eau.}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 2,7273 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 4).}$$

$$Q_{\text{air}} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

Temps (mn)	0,34	1	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13
V _{HCl} (ml)	5	8,65	9,3	9,2	9,3	9,2	9,3	9,2	9	8,9	9,4	9,4
C _{MEA} (mol/l)	0,25	0,432	0,46	0,46	0,465	0,45	0,465	0,46	0,45	0,445	0,47	0,47
C _{CO₂} (mol/l) 10 ³	1,64	2,65	2,80	2,80	2,83	2,80	2,83	2,80	2,86	2,72	2,86	2,86

s) Essai N°19 :

$$C_{B(c)} = 1 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 6).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 4,5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	1,5	1,75	3	4	5	6	7	10	13
V_{HCl} (ml)	1,25	2,65	4,5	5,1	5,6	6,5	6,5	7	7	7,2	7,2
C_{MEA} (mol/l)	0,062	0,132	0,225	0,255	0,28	0,225	0,325	0,325	0,35	0,36	0,36
C_{CO_2} (mol/l) 10^3	3,10	3,47	3,95	4,10	4,23	4,47	4,47	4,59	4,59	4,67	4,64

t) Essai N°20 :

$$C_{B(c)} = 1 \text{ mole/l.}$$

$$Q_{CO_2} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s. (position 8).}$$

$$Q_{air} = 1,6528 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 57).}$$

$$L = 0,0213 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s (position 30).}$$

$$\Delta P_{colonne} = 5 \text{ cm d'eau.}$$

Temps (mn)	0,5	1	1,5	2,5	5	6	7	8	9	10	11	13
V_{HCl} (ml)	1,6	2,6	2,9	3,4	3,8	4,2	5,2	6,2	6,16	6,2	6,16	6,16
C_{MEA} (mol/l)	0,08	0,13	0,145	0,17	0,172	0,167	0,172	0,167	0,167	0,167	0,167	0,172
C_{CO_2} (mol/L) 10^3	4,95	5,19	5,27	5,39	5,49	5,59	5,84	6,08	6,03	6,08	6,03	6,03