

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

23/87

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

Alex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT Génie Chimique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE TRANSFERT DE MATIÈRE  
EN UN FILM LIQUIDE TOMBANT EN  
RÉGIME LAMINAIRE SUR UNE PLAQUE  
PLATE INCLINÉE

Proposé par : A. CIĒSLAK

Etudié par : CHENNA. A

Dirigé par : A. CIĒSLAK

PROMOTION : JUIN 87

D E D I C A C E S

\*\*\*\*\*

\* Ce modeste travail est dédié :

- A la mémoire de mon père ,
- A la mémoire de ma soeur,
- A toute ma famille,
- A tous mes amis(es)

REMERCIEMENT  
\*\*\*\*\*



Au terme de ce travail , je tiens à témoigner ma  
ma profonde reconnaissance à Monsieur A. CIESLAK  
Maître de conférence à L'ENP, qui a dirigé ce travail  
de projet de fin d'études et pour ces conseils avisés  
durant tout les essais .

Qu'il me soit permis de remercier Mademoiselle W.: YAICI .  
Maître assistante à L'ENP qui malgré ses différentes  
occupations à accepté de présider mon jury , Madame DJELLAS ,  
Madame ABBAS-TURKI et Monsieur BENIDDIR, qui ont voulu juger  
le présent travail.

Ainsi à ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma  
formation .

---

MEMBRE DE JURY

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PRES IDANTE :

Melle, W; YAICI Maitre assistante à l'ENP

MEMBRES :

Mme, T. DJELLAS Maitre assistante à l'ENP

Mme, ABBAS -TURKI Maitre assistante à l'ENP

Mr, A.CIESLAK Maitre de conférence à l'ENP

Mr, M.BENNIDIR Maitre assistant à l'ENP

SUJET:

Etude de transfert de matière en un film liquide tombant sur une plaque plate inclinée, en régime laminaire.

RESUME

Nous avons déterminé les coefficients d'échange de masse d'un film liquide d'eau en écoulement laminaire, tombant librement sur une plaque plate inclinée de longueur 1,00 m, pour huit inclinaisons différentes. Par absorption de  $CO_2$  par le film d'eau. Une corrélation de type  $\beta_{exp} = K \cdot \Gamma^n (\sin \alpha)^m$ , est déterminée pour interpréter les résultats expérimentaux.

SUBJECT:

Mass transfer to falling liquid film in laminar flow on flat plate inclined.

ABSTRACT:

Mass transfer coefficients has been obtained for absorption  $CO_2$  in water in the rang of free laminaire liquid film and eigh angles of the inclinaiton 1,00m wall leagthe. The corrélation of type  $\beta_{exp} = K \cdot \Gamma^n \cdot \sin \alpha^m$  has been used for discription expérimentals résultats.

الموضوع: دراسة التحويل المادي إلى طبقة رقيقة من الماء تسبب حرة على لوحة مائلة.

الملاحظ: وجدنا التوزيع معاملات بقول المادية لطبقة رقيقة من الماء وذلك بعملية امتصاص الغاز  $CO_2$  بالماء تسبب على لوحة طولها 1,00 م مائلة بالزاوية (ب) حيث العملية مائتانية زوايا مختلفة. لى شرح نتائج تجريبية وجدنا علاقة من شكل  $\beta = K \cdot \Gamma^n (\sin \alpha)^m$

# S O M M A I R E



INTRODUCTION . .

## I) PARTIE THEORIQUE

I-1 Phénomène de diffusion

I-2 Mode de transfert de matière

I-3 Equation différentielle de diffusion-convection

## II) TRANSFERT DE MATIERE ENTRE PHASE

II-1 Coefficient de transfert de matière

II-2 Relation entre les coefficients globaux et les coefficients partiels .

## III) CONSIDERATION THEORIQUE SUR L'ÉCOULEMENT D'UN FILM LIQUIDE

III-1 Profil de vitesse

III-2 Expression de la vitesse moyenne du film

III-3 Expression de l'épaisseur du film

III-4 Régime de l'écoulement du film

## IV) ETUDE THEORIQUE DE TRANSFERT DE MATIERE EN FILM LIQUIDE

TOMBANT EN REGIME LAMINAIRE .

IV-1 Formulation du problème

IV-2 Profil de concentration

IV-3 Détermination théorique de coefficient moyen de transfert de matière .

## V) PARTIE EXPERIMENTALE

V-1 Montage expérimental

V-2 Essais expérimentaux

## VI) CONCLUSION

## VII) ANNEXES



Ce présent travail consiste en une étude théorique et expérimentale de transfert de matière en un film liquide Newtonien, tombant sur une plaque plate inclinée.

L'étude théorique étant facilitée pour les suppositions que l'on peut proposer à savoir :

La surface de contact qui est plane, ainsi que la nature de l'écoulement du film qui est laminaire .

En réalité ce phénomène est très complexe vu que le film présente une certaine turbulence à la surface libre, ceci engendre une divergence entre la théorie et la réalité .

Dans le cadre de ce travail nous allons étudier la cinétique du transfert de matière en déterminant le coefficient de transfert de matière du film liquide, théoriquement en se basant sur la solution de Pigford et Johnson et expérimentalement par absorption du  $CO_2$  par un film d'eau, dans un appareil spécialement réalisé .

Nous allons comparer les résultats prévus par la théorie à ceux calculés expérimentalement .

Nous allons ensuite déterminer une corrélation entre le coefficient de transfert de matière et les conditions opératoires à savoir :

Le débit spécifique du film liquide et l'inclinaison de la plaque .

1:1 : PHENOMENES DE DIFFUSION :

- Les phénomènes relevant de ce que l'on appelle transfert de matière manifestent chaque fois dans un mélange fluide, les différents constituants sont en déplacements relatifs les uns par rapport aux autres . Ceci se produit en particulier lorsque les concentrations ne sont pas uniformes au sein du mélange; si par conséquent un constituant prend naissance ou disparaît dans l'écoulement il se produira un transfert de matière de ce constituant à partir des régions où la concentration est la plus forte vers la région où la concentration est la plus faible. D'une manière générale le transfert de matière désigne le passage d'un constituant dans un autre mélange séparé du premier par l'interface. C'est un processus très complexe, la migration s'effectue suivant un processus diffusionnel, Elle résulte d'un mouvement désordonné des molécules ou des particules .

Ce mouvement de pénétration des molécules ou particules se développe par suite de gradient de concentration locale résultant de l'écart existant entre les concentrations . Ce déplacement des molécules ou particules ~~ax~~ à travers une substance peut aussi provenir soit d'un gradient de pression, soit d'un gradient de température appliquée sur l'ensemble du mélange, soit sous l'effet d'un champ sélectif de forces appliquées de l'extérieur au système que l'on appelle la diffusion forcée. La diffusion provenant de l'effet de température est dite diffusion théorique.

## 1.2: MODE DE TRANSFERT DE MATIERE :

On distingue deux modes de transfert de matière .

- Diffusion moléculaire , analogue à la conduction en transfert de chaleur .
- Diffusion turbulante analogue à la convection en transfert de chaleur .

### 1.2.1. : DIFFUSION MOLECULAIRE

La diffusion moléculaire a pour effet de redistribuer les molécules de telle façon qu'il se passe un transfert des régions les plus denses vers les régions les moins denses .

Elle a lieu dans un fluide immobile et au régime laminaire .

- La diffusion moléculaire fait l'objet de la loi de FICK.

- En considérant la concentration du diffusion est uniforme dans tout plan perpendiculaire à l'axe des "X" . On pourra écrire en régime stationnaire de concentration que:

Le flux N ou la vitesse nette de transfert du diffusant à travers l'unité de surface d'un plan perpendiculaire à l'axe "X" à un moment donné est :

$$N = D \left( - \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad ( 1 - 1 )$$

$-\frac{\partial c}{\partial x}$  : est le gradient de concentration au point d'abscice x à un instant donné .

- D est le coefficient de diffusion moléculaire du soluté de concentration " c" .

1.2.2.1. : CONVECTION /:

On distingue la convection libre ( naturelle ) dans laquelle le mouvement du fluide résulte simplement de la différence de densité du fluide, de la convection forcée dans laquelle le mouvement du fluide est produit par une action extérieure ( Pompe...)

1.2.2.2: TRANSFERT DE MATIERE PAR CONVECTION:

Dans un fluide où la concentration d'un constituant n'est pas uniforme un transfert de ce constituant peut être réalisé à travers la matière fluide par un autre mode que la diffusion à l'échelle moléculaire lorsque le fluide est en mouvement où l'origine est turbulent, les éléments de volume formés d'un ensemble des molécules se déplacent par rapport à la matière voisine et conduisent à un transfert de ce constituant causant une diffusion turbulente. Cette dernière résulte de la combinaison des fluctuations de vitesses et de concentration. Elle peut se caractériser par un coefficient de transfert de matière par convection ( ou coefficient de diffusion turbulente ) (1) noté et on pourra écrire une équation similaire à (1 - 1) qui est exprimée comme suit :

$$N_A = E_T \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (1-2)$$

$N_A$  : Vitesse nette du diffusant à travers l'unité de surface d'un plan perpendiculaire à l'axe "OX" sens de l'écoulement fluide ;

$\frac{\partial C_A}{\partial x}$  ; gradient de concentration au point d'abscisse "x" à l'instant donné.

$E_T$  : coefficient de diffusion turbulente

celui-ci dépend fortement de l'écoulement, des propriétés du <sup>fluide</sup> et la géométrie du système .

1.3 : EQUATION DIFFERENTIELLE DE DIFFUSION - CONVECTION :

- On considère un élément de fluide et on applique le principe de conservation de masse pour l'espèce chimique "A" dans le cas d'un mélange binaire A B

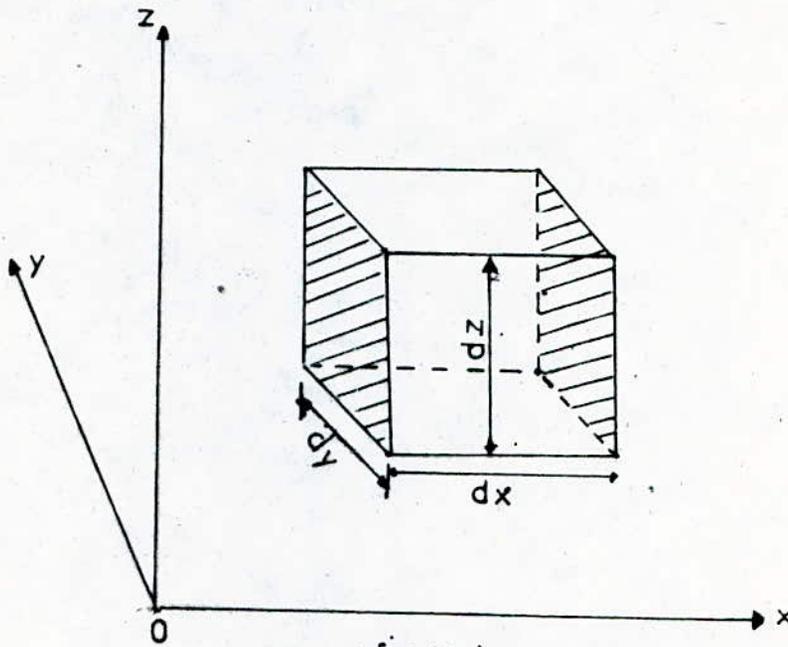


fig (1)

-La quantité de substance de "A" entrant par diffusion moléculaire par la face gauche pendant le temps dt, selon la direction Ox est égale à:

$$M'_{M_x} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} dy dz dt \quad (1-3)$$

-La quantité de substance "A" sortant par diffusion moléculaire par la face droite selon la direction Ox est égale à:

$$M'_{M(x+dx)} = -D_{AB} \frac{\partial}{\partial x} (C_A + \frac{\partial C_A}{\partial x} dx) dy dz dt \quad (1-4)$$

- Ainsi la quantité de substance de "A" emmagasinée par diffusion moléculaire dans le volume élémentaire pendant dt est donné par :

$$dM'_{M,x} = M'_{M,x} - M'_{M,(x+dx)} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} dx dy dz dt = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} dv dt \quad (1-5)$$

par analogie on a:

$$dM'_{M,y} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (1-6)$$

$$dM'_{M,z} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (1-7)$$

- La quantité totale de substance de "A" emmagasinée par diffusion moléculaire dans le volume élémentaire est égale à :

$$dM' = dM'_{M,x} + dM'_{M,y} + dM'_{M,z} = D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] \quad (1-8)$$

-- La variation de débit de la substance "A" dans le volume élémentaire pendant dt se calcule par l'équation suivante :

$$dM'_t = \frac{\partial C_A}{\partial t} dv dt \quad (1-9)$$

- La quantité de substance de "A" entrant par convection par la face gauche selon la direction Ox s'écrit :

$$M'_{T,x} = U_x dy dz C_A dt \quad (1-10)$$

- La quantité de substance "A" sortant par convection par la face droite selon la direction Ox est égale à :

$$M'_{T,(x+dx)} = U_x dy dz dt C_A + \frac{\partial (U_x C_A)}{\partial x} dx dy dz dt \quad (1-11)$$

- La quantité de substance emmagasinée dans le volume élémentaire pendant le temps dt est égale à :

$$dM'_{T,x} = M'_{T,x} - M'_{T,(x+dx)} = - \frac{\partial (U_x C_A)}{\partial x} dx dy dz dt \quad (1-12)$$

- D'une manière analogue en direction Oy , Oz on a :

$$dM'_{T,y} = - \frac{\partial (U_y C_A)}{\partial y} dv dt \quad (1-13)$$

$$dM'_{T,z} = - \frac{\partial (U_z C_A)}{\partial z} dv dt \quad (1-14)$$

Ainsi la quantité totale de substance "A" emmagasinée par convection dans le volume élémentaire pendant le temps dt est égale à :

$$dM'_T = dM'_{T,x} + dM'_{T,y} + dM'_{T,z}$$

En remplaçant  $dM'_{T,x}$ ,  $dM'_{T,y}$ ,  $dM'_{T,z}$  par leurs expressions (1,12), (1,13), (1,14)

il vient que :

$$dM'_T = - \left[ \frac{\partial(U_x C_A)}{\partial x} + \frac{\partial(U_y C_A)}{\partial y} + \frac{\partial(U_z C_A)}{\partial z} \right] dv dt \quad (1-15)$$

En développant l'équation (1-15)

il vient que :

$$dM'_T = - \left[ U_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + U_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + U_z \frac{\partial C_A}{\partial z} + C_A \frac{\partial U_x}{\partial x} + C_A \frac{\partial U_y}{\partial y} + C_A \frac{\partial U_z}{\partial z} \right] dv dt$$

Selon l'équation de continuité de fluide pour un mouvement (1-16)

stationnaire on a :

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (1-17)$$

D'où l'équation (1-16) se ramène à :

$$dM'_T = - \left[ U_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + U_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + U_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \right] dv dt \quad (1-18)$$

Si le constituant "A" est produit par réaction chimique avec un débit de production  $R_A$

la quantité de substance de "A" produite dans l'élément de volume pendant le temps dt est égale à :

$$dM'_p = R_A dv dt \quad (1-19)$$

- Selon la loi de conservation de masse, la variation de la masse de la substance due à la diffusion moléculaire et à la convection dans le volume élémentaire pendant le temps dt doit être égale à la variation de masse de cette substance pendant dt, moins la quantité de cette substance produite par réaction chimique .

Soit:

$$dM'_T + dM'_M = dM'_t - dM'_p \quad (1-20)$$

En remplaçant chaque terme de l'équation (1-20) par leurs expressions qui sont respectivement (1-18), (1-8), (1-9) , (1-1

On aura:

$$\begin{aligned} - (U_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + U_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + U_z \frac{\partial C_A}{\partial z}) dv dt + D_{AB} (\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}) dv dt \\ = \frac{\partial C_A}{\partial t} dv dt - R_A dv dt \quad (1-21) \end{aligned}$$

en divisant les deux membre de l'équation (1-21) par dv.dt

il vient que :

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + (U_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + U_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + U_z \frac{\partial C_A}{\partial z}) = D_{AB} (\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}) + R_A \quad (1-22)$$

- Cette équation traduit la loi de la distribution de la concentration du constituant considéré dans le fluide en mouvement stationnaire , avec le transfert de matière non stationnaire.

CHAPITRE/II

TRANSFERT DE MATIERE ENTRE LES PHASES

LIQUIDE ET GAZEUSE

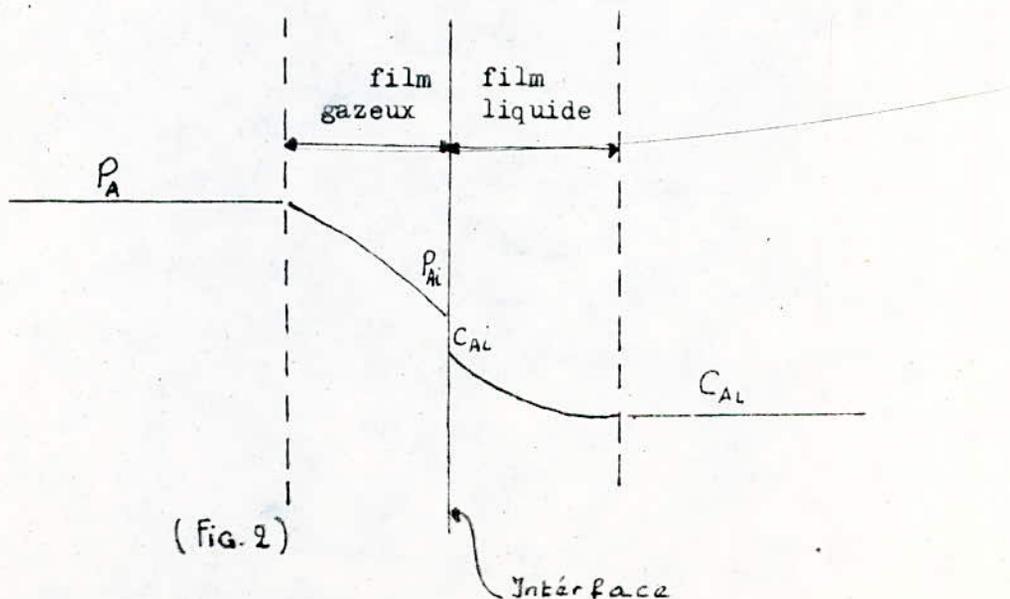
2:1: COEFFICIENTS DE TRANSFERT DE MATIERE :

Considérons une phase gazeuse au contact d'une phase liquide et supposons que la phase gazeuse contient un soluté "A" soluble dans la phase liquide avec laquelle il ne réagit pas . Le transfert du soluté "A" dans la phase liquide prend place en trois étapes .

- Diffusion du gaz à la surface du liquide .
- Dissolution dans le liquide .
- Diffusion de la surface vers l'intérieur du liquide .

Il a été suggéré par( WHITMAN en1923) , que le flux d'absorption est controlé par les flux de diffusion sur chaque côté de l'intérface et que l'équilibre est atteint à la surface instantanément ( 2 ) .

En se basant sur cette théorie ; le processus de transfert de matière peut être schématisé comme l'indique la figure ( 2 ) avec un gradient de préssion  $P_A$  à  $P_{Ai}$



- Si l'équilibre est établi à la surface du liquide, la concentration est la valeur saturée en équilibre avec la pression  $P_{Ai}$ .

- Si la résistance à l'interface est négligable la densité molaire du flux de A s'écrit alors :

$$N_A = k_G (P_A - P_{Ai}) = k_L (C_{Ai} - C_{Al}) \quad (2 - 1)$$

-  $k_G, k_L$  : sont des coefficients partiels de transfert dans la phase gazeuse et la phase liquide.

(  $C_{Ai} - C_{Al}$  ), (  $P_A - P_{Ai}$  ) sont des forces motrices.

- Pratiquement cette expression de la densité molaire du flux  $N_A$  ne peut être exploitée du fait que les valeurs de  $P_{Ai}$  et  $C_{Ai}$  ne sont pas connues d'où l'utilisation de la notion des coefficients de transfert globaux défini comme suite

$$N_A = K_G (P_A - P_{Ae}) = K_L (C_{Ae} - C_{Al}) \quad (II - 2)$$

- La signification des grandeurs utilisées dans les deux équations précédentes sont portées sur la figure (3)

. Le point E représente le point opératoire du soluté gazeux de pression  $P_A$  transféré dans le liquide de concentration  $C_{Al}$ .

. Le point F indique le gaz de pression  $P_{Ai}$  en équilibre avec la solution de concentration  $C_{Ai}$ .

- Le point G représente le gaz A de pression  $P_{Ae}$  en équilibre avec la solution  $C_{Ae}$ .

- Le point H représente la solution de concentration  $C_{Ae}$  en équilibre avec un gaz de pression partielle  $P_A$ .

2 : 2 : RELATION ENTRE LES COEFFICIENTS GLOBAUX

ET LES COEFFICIENTS PARTIELS:

- La relation entre les coefficients globaux et les coefficients individuels peut être établie en considérant que le gaz très soluble et à faible pression partielle pour lequel nous pouvons appliquer la loi de HENRY, exprimée par la relation

$$P = H.C \quad (2-3)$$

- P : pression partielle en équilibre avec C.

H : Constante d'HENRY :

Il vient que :

$$P_{Ai} = H C_{Ai} \quad (2-4)$$

$$P_{Ae} = H C_{Al} \quad (2-5)$$

$$P_A = H C_e \quad (2-6)$$

A partir de l'expression ( 2 - 2 ).

$$N_A = K_G ( P_A - P_e ) \quad ( 2 - 7 ).$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{P_A - P_{Ae}}{N_A} = \frac{P_A - P_{Ai}}{N_A} + \frac{P_{Ai} - P_{Ae}}{N_A} \quad ( 2 - 8 )$$

- Faisons :

$$( 2 - 4 ) - ( 2 - 5 ) : P_{Ai} - P_{Ae} = H ( C_{Ai} - C_{Al} )$$

et remplaçons dans l'aquation ( 2 - 8 )

Il vient que :

$$\frac{1}{K_G} = \frac{P_A - P_{Ai}}{N_A} + H \left( \frac{C_{Ai} - C_{Al}}{N_A} \right) \quad ( 2 - 9 )$$

De l'équation ( 2 - 1 ) nous avons :

$$\frac{P_A - P_{Ai}}{N_A} = \frac{1}{k_G}$$

et

$$\frac{C_{Ai} - C_{Al}}{N_A} = \frac{1}{k_L}$$

L'expression ( 2 - 9 ) s'écrit alors :

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad ( 2 - 10 ).$$

De l'équation ( 2 - 2 ). On a :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{C_{Ae} - C_{Al}}{N_A} = \frac{C_{Ae} - C_{Ai}}{N_A} + \frac{C_{Ai} - C_{Al}}{N_A} \quad ( 2 - 11 )$$

Faisons ( 2 - 6 ) - ( 2 - 4 ) :  $C_{Ae} - C_{Ai} = \frac{P_A - P_{Ai}}{H}$ .

En remplaçant dans l'équation ( 2 - 11 ).

et comme  $\frac{P_A - P_{Ai}}{N_A} = \frac{1}{k_G}$  ,  $\frac{C_{Ae} - C_{Al}}{N_A} = \frac{1}{k_L}$

L'expression ( 2 - 11 ) s'écrit :

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{H k_G} + \frac{1}{k_L} \quad ( 2 - 12 ).$$

Soit donc :

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{H k_G}$$

- Les équations ( 2-10) et ( 2- 12) , montrent que la résistance globale au transfert de matière est la somme des résistances partielles des deux couches limites en série .

- Les procédés de transfert telleque l'absorption sont invariablement controlés par le coefficient du film liquide puisque pour un gaz pur

$$P_{Ai} = P_A \quad \text{et } k_G \text{ est infini .}$$

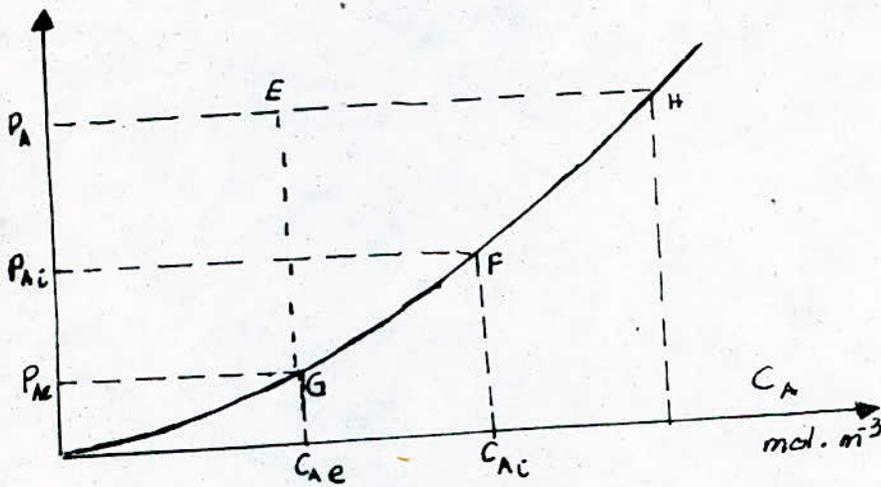


Illustration des écarts à l'équilibre pour un système gaz-liquide

Fig (3)

CHAPITRE : III

CONSIDERATION THEORIQUE SUR L'ÉCOULEMENT  
D'UN FILM LIQUIDE TOMBANT SUR UNE PLAQUE  
PLATE INCLINÉE , EN RÉGIME LAMINAIRE .

3:1: PROFIL DE VITESSE DU FILM :

La théorie de ce mode d'écoulement a été développée par Nusselt (1916) (3), en considérant que le film ne subira aucune déformation et se comporterait comme une couche solide glissant sur le liquide, en négligeant les forces de tension superficielle . dans ces conditions idéales ; On pourra écrire l'équation de mouvement pour un liquide Newtonien (3), selon la direction "Ox" de l'écoulement comme suit :

$$(U_x \frac{\partial}{\partial x} + U_y \frac{\partial}{\partial y} + U_z \frac{\partial}{\partial z}) U_x = - \frac{1}{\rho_L} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 U_x + g_x \quad (3-1)$$

-En considérant les hypothèses suivantes :

A/ Procédus stationnaire;  $U_x$  ne change pas le long de l'axe "Ox"

B/ l'écoulement est unidirectionnel ,  $U_y$  ,  $U_z$  sont égales à zéro.

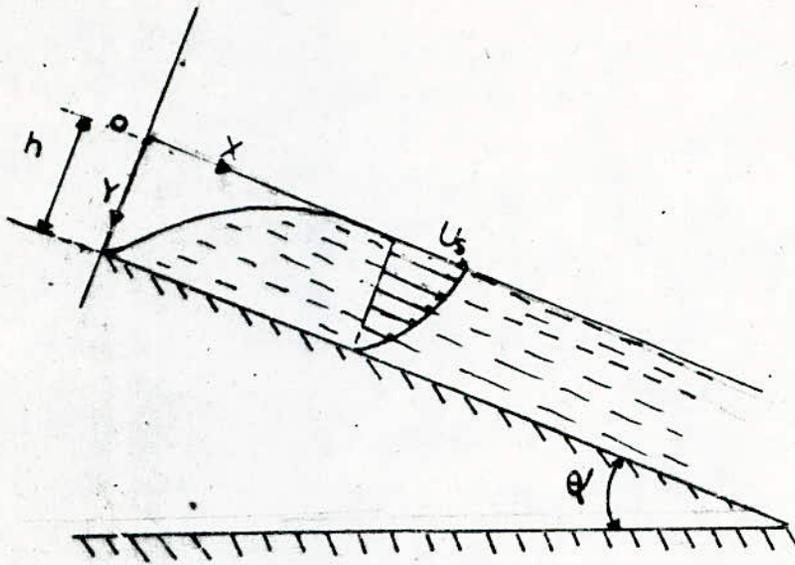
C/ La pression à la surface libre du film est la même en chaque point  $\frac{\partial P}{\partial x}$  et égale à zéro .

D/  $\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}$  et  $\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}$  sont nulles.

-Le modèle d'écoulement du film et les coordonnées du système sont schématisés par la figure (4) .

-Compte tenu de toutes les restrictions précédentes l'équation (3-1) se ramène à:

$$\mu \frac{d^2 U_x}{dy^2} = - \rho_L g_x \quad (3-2)$$



( MODELE D'ÉCOULEMENT & COORDONNÉES DU SYSTEME )

Fig ( 4 ) .

avec:

$\rho_x = g \sin \alpha$  - L'équation ( 3 - 2 ) s'écrit alors :

$$\mu \frac{d^2 U_x}{dy^2} = -\rho_x \sin \alpha \quad (3 - 3)$$

soumettons ( 3 - 3 ) à l'intégration aux conditions <sup>aux</sup> limites .

qui s'écrivent conformément au modèle :

$$y=0 \quad \frac{dU_x}{dy} = 0 \quad (3-4a) \quad (3 - 4)$$

$$y=h \quad U_x = 0 \quad (3-4b)$$

il vient que :

$$\frac{dU_x(y)}{dy} = -\frac{\rho_x \sin \alpha}{\mu} y + C_1 \quad (3 - 5)$$

pour  $y=0$   $\frac{dU_x(y)}{dy} = 0$ , il vient que  $C_1 = 0$

En soumettant encore une fois l'équation ( 3 - 5) à l'intégration avec les mêmes conditions limites ( 3 - 4)

il vient que:

$$U_x (y) = -\frac{\rho_l g \sin \alpha}{2 \mu_l} y^2 + C_2$$

pour  $y=h$   $U_x = 0$

il vient que  $C_2 = \frac{(\rho_l g \sin \alpha) \cdot h^2}{2 \mu_l}$

Finalement l'expression de  $U_x(y)$  s'écrit:

$$U_x(y) = \frac{(\rho_l g \cdot \sin \alpha) \cdot h^2}{2 \mu_l} \cdot \left(1 - \left(\frac{y}{h}\right)^2\right) \quad (3 - 6)$$

D'après l'équation ( 3 -6) le profil de vitesse est parabolique .

3:2 EXPRESSION DE LA VITESSE MOYENNE DU FILM :

La vitesse moyenne du film se calcule par la relation suivante:

$$U_m = \frac{1}{h} \int_{y=0}^{y=h} U_x(y) dy = \frac{1}{h} \int_{y=0}^{y=h} \frac{\rho_l g \cdot \sin \alpha \cdot h^2}{2 \mu_l} \left(1 - \left(\frac{y}{h}\right)^2\right) dy$$

Il vient que :

$$U_m = \frac{\rho_l g \cdot \sin \alpha \cdot h^2}{3 \mu_l} \quad (3-7)$$

La vitesse est maximale à l' surface libre du film ;

elle se calcule en posant  $y=0$  dans la relation

( 3 - 6 ) ; elle est égale à:

$$U_s = \frac{g \cdot \sin \alpha \cdot h^2}{2 \mu_1} \quad (3-8)$$

**3.3; EXPRESSION DE L'ÉPAISSEUR DU FILM:**

Débit volumique moyen :

$$\dot{V} = b \cdot h \cdot U_m \quad (3-9)$$

b: largeur du film (largeur de la canalisation)

h: Epaisseur du film

$U_m$ : vitesse moyenne du film

En remplaçant  $U_m$  par son expression (3-7) (3-9), s'écrit :

$$\dot{V} = \frac{b \cdot h^3 \cdot \sin \alpha}{3 \mu_1} \quad (3-10)$$

Soit  $\Gamma$  débit massique moyen par unité de largeur de la plaque .

$$\Gamma = \frac{\dot{V} \rho}{b}$$

Apartir de l'équation (3-10) qui s'écrit comme suit:

$$\dot{V} = b \cdot h \cdot U_m = \frac{b \cdot h^3 \cdot \sin \alpha}{3 \mu_1}$$

Il vient que :

$$h = \left( \frac{3 \mu_1 \cdot \Gamma}{\rho \cdot g \cdot \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (3-11)$$

3:4: REGIME D'ÉCOULEMENT DU FILM TOMBANT :

Le régime d'écoulement est déterminé par la valeur du nombre de Reynolds, qui est défini dans ce mode d'écoulement comme suit :

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu_L}$$

$\Gamma$ : débit massique du liquide par unité de largeur de la plaque

$\mu_L$ : viscosité dynamique du liquide .

-En réalité les études expérimentales de ce mode d'écoulement ont conduit à trois régimes :

- régime laminaire pur .
- régime laminaire avec ondes .
- régime turbulent .

-Régime laminaire avec ondes :

En ce cas  $Re' \leftarrow 2100$  . La surface libre du film n'est plus plane mais ondulée . on se rend parfaitement compte des répercussions directes de ce phénomène sur le transfert de matière du fait que :

- La surface libre du film n'est pas constante.
- La hauteur du film qui devient inconnue.

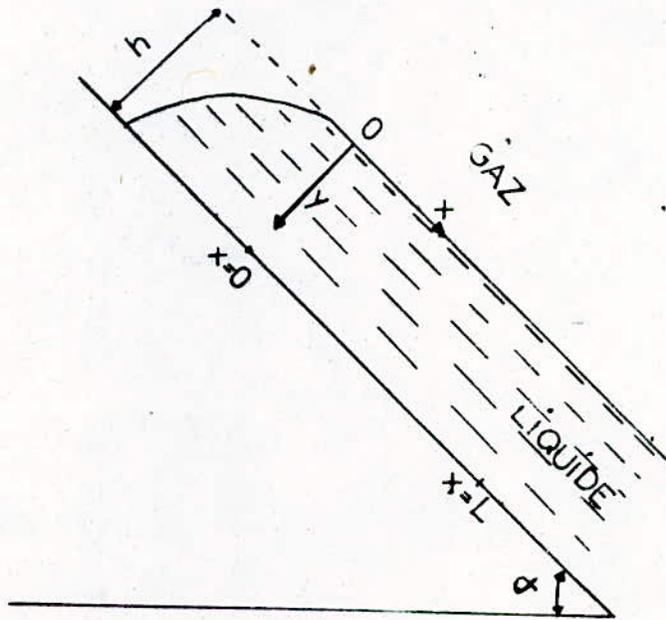
Les ondes se forment dès les faibles débits du liquide qui correspondent à un nombre de Reynolds supérieur à

4 .

CHAPITRE:IV

† ETUDE THEORIQUE DE TRANSFERT DE MATIERE  
EN UN FILM LIQUIDE TOMBANT EN REGIME LAMINAIRE :

- On se propose d'étudier un échange de masse d'un gaz à un film liquide à contact direct et à faible flux. L'étude porte sur un film liquide tombant sous l'action de son poids sur une plaque plate inclinée comme le montre la figure (5).



fig(5)

4:1: FORMULATION DU PROBLEME :

L'équation traduisant la loi de la distribution de la concentration d'un constituant considéré dans un fluide en mouvement stationnaire, avec le transfert de matière non stationnaire, et en présence de réaction chimique dans le système considéré est donnée par:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + (U_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + U_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + U_z \frac{\partial C_A}{\partial z}) = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + R_A$$

On considère les hypothèses suivantes :

A: Dans le système pas de réaction chimique  $R_A = 0$

B: Le régime est établi  $\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0$

C: Le flux de transfert de matière est faible; dans ce cas le domaine de vitesse de film peut être considéré inafecté par la diffusion spécifiquement.

D: Le transfert de matière ne se fait que par convection dans le sens de l'écoulement du fluide, la diffusion dans ce sens est négligée  $\frac{\partial C_A}{\partial x^2} = 0$

E: Pas de transfert de matière dans la direction Oz, toutes les dérivés sont nulles.

G: L'écoulement du film est unidirectionnel  $U_y, U_z$  sont nulles

H: Les propriétés physiques du liquide à savoir:

$D_{AB}, \rho_L, \mu_L$  sont considérés inafectés par le transfert de matière elles restent constantes.

Le modèle physique est montré par la figure ( 5 ) .

Compte tenu de toutes les restrictions précédentes l'équation de diffusion-convection (4-1), se ramène à:

$$U_x \frac{\partial C_A}{\partial x} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (4-2)$$

Avec les conditions aux limites qui s'écrivent conformément au système:

$$\begin{aligned}
 y=0 & \quad C_A = C_{Ao} \\
 y=h & \quad \frac{\partial C_A}{\partial y} = 0 \\
 x=0 & \quad C_A = C_{Ai}
 \end{aligned}
 \quad (4-3)$$

$C_{Ao}$  : Concentration en soluté "A" gazeux dans le liquide à l'entrée de la zone d'absorption .

$C_{Ai}$  : Concentration en soluté "A" à l'interface Gaz-Liquide .

4-2 : PROFIL DE CONCENTRATION :

LA détermination des profils de concentration du soluté "A" passe par la résolution simultanément de l'équation (4-2), et l'équation(3-2) qui décrit l'écoulement du film liquide.

- Par conséquent pour un profil de vitesse parabolique du film liquide l'équation(4-2); s'écrit :

$$U_{max} \left(1 - \left(\frac{y}{h}\right)^2\right) \frac{\partial C_A}{\partial x} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \quad (4-4)$$

$U_{max}$  : Vitesse de la surface libre du film liquide.

$h$  : Epaisseur du film liquide .

- PIGFORD et JOHNSTONE ET VYAZOVOV; (3)

Ont résolu l'équation différentielle (4-4), aux conditions limites (4-3); dans le cas de l'absorption d'un gaz par un film liquide Newtonien, tombant sur les parois d'une colonne verticale (colonne à parois mouillées).

La solution est donnée sous forme d'une série illimitée, qui s'exprime comme suit :

$$\frac{C_{Al} - C_{Ao}}{C_{Ai} - C_{Ao}} = 1 - \sum a_n \cdot e^{-b_n \cdot F'_0} \quad (4-5)$$

$a_n, b_n$  : Sont des constantes, dont les quatre premières valeurs sont données dans le tableau suivant :

$n$	$a_n$	$b_n$
1	0.7857	5.121
2	0.1001	39.27
3	0.0360	105.60
4	0.0181	204.70

$C_{Al}$  : Concentration en soluté "A" dans le liquide à la sortie de la zone d'absorption .

$C_{Ai}$  : Concentration en soluté "A" à l'interface Gaz-Liquide .

$C_{Ao}$  : Concentration en soluté "A" dans le liquide à l'entrée de la zone d'absorption .

$F'_0$  : est défini comme suit :

$$F'_0 = \frac{D_{AB} \cdot t}{h^2} \quad (4-6)$$

$t$  : temps d'exposition de la surface libre du film au gaz.

$h$  : l'épaisseur du film liquide

$D_{AB}$  : coefficient de diffusion moléculaire du binaire A-B

4.3 : DETERMINATION THEORIQUE DU COEFFICIENT MOYEN DE TRANSFERT DE MATIERE DU FILM LIQUIDE.

-Faisons un bilan de matière en soluté "A" gaz absorbé par le film liquide sur la longueur "L" de contact gaz-liquide (zone d'absorption)

- En choisissant la moyenne logarithmique de la différence de concentration comme force motrice.

-Le bilan de matière s'écrit:

$$G'_A = k_L (\Delta C_A)_{Ln} \cdot A' = \dot{V} (C_{AL} - C_{Ao}) \quad (4-9)$$

$k_L$ : coefficient moyen de transfert de matière du film liquide

$A'$ : Surface de contact Gaz-Liquide .

$(\Delta C_A)_{Ln}$ : Différence moyenne logarithmique de concentration.

$\dot{V}$ : Débit volumique du liquide .

$C_{Ao}$ : Concentration en soluté "A" dans le liquide à l'entrée dans la zone d'absorption .

$C_{AL}$ : Concentration moyenne en soluté "A" dans le liquide à la sortie de la zone d'absorption .

$(\Delta C_A)_{Ln}$ : Est définie comme suit:

$$(\Delta C_{AL})_{Ln} = \frac{(C_{Ai} - C_{AL}) - (C_{Ai} - C_{Ao})}{Ln \frac{C_{AL} - C_{Ao}}{C_{Ai} - C_{Ao}}} \quad (4-10)$$

Apartir de l'équation(4- 9) on a:

$$k_L = \frac{\dot{V}}{A'} \frac{C_{AL} - C_{AO}}{(\Delta C_A)_{Ln}} = \frac{\dot{V}}{A'} \cdot \frac{C_{AL} - C_{AO}}{\frac{(C_{Ai} - C_{AL}) - (C_{Ai} - C_{AO})}{Ln} \frac{C_{AL} - C_{AO}}{C_{Ai} - C_{AO}}} \quad (4-11)$$

Après simplification de l'expression (4-11)

il vient que:

$$k_L = -\frac{\dot{V}}{A} Ln \frac{C_{Ai} - C_{AL}}{C_{Ai} - C_{AO}} = -\frac{\dot{V}}{A} Ln \left( 1 - \frac{C_{AL} - C_{AO}}{C_{Ai} - C_{AO}} \right) \quad (4-12)$$

Soit:  $\varepsilon = \frac{C_{AL} - C_A}{C_{Ai} - C_{AO}}$

du fait que  $\varepsilon$  est souvent très inférieur à 1 ,

nous faisons un développement limité de la fonction  $Ln(1-\varepsilon)$  qui est:

$$Ln(1-\varepsilon) = -\varepsilon - \frac{\varepsilon^2}{2} - \frac{\varepsilon^3}{3} \dots$$

l'équation(4-12) devient :

$$k_L = \frac{\dot{V}}{A} \left( \frac{C_{AL} - C_{AO}}{C_{Ai} - C_{AO}} \right) \quad (4-13)$$

Soit:

$b$ : Largeur de la plaque

$\Gamma$ : Débit massique du film liquide par unité de largeur de la plaque ; il est exprimé comme suit :

$$\Gamma = \frac{\dot{V}e_L}{b} = \frac{U_{moy} \cdot b \cdot h e_L}{b} = U_{moy} \cdot h \cdot e \quad (4-14)$$

$$A' = b \cdot L \quad (4-15)$$

En substituant la valeur de  $\varepsilon$  donnée par l'équation (4-8).

L'équation (4-13) s'écrit alors :

$$k_L = \frac{\dot{V}}{A} \sqrt{\frac{6}{\pi}} \left( \frac{D_{AB} L}{h^2 U_{moy}} \right)^{1/2} \quad (4-16)$$

En introduisant l'équation (4-14), (4-15)

L'équation (4-16)

il vient que :

$$k_L = \frac{\Gamma b}{\rho_L b L} \sqrt{\frac{6}{\pi}} \left( \frac{D_{AB} L h \rho_L}{h^2 \Gamma} \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \left( \frac{D_{AB} \Gamma}{\rho_L \cdot L \cdot h} \right)^{1/2} \quad (4-17)$$

EN réarrangeant l'équation (4-17), en l'écrivant de la façon suivante:

$$\frac{k_L \cdot h}{D_{AB}} = \sqrt{\frac{6}{4\pi}} \cdot \left( \frac{4\Gamma}{\mu_L} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{\mu_L}{\rho_L \cdot D_{AB}} \right)^{1/2} \left( \frac{h}{L} \right)^{1/2} \quad (4-18)$$

D'après (3-11), "h" l'épaisseur du film liquide est exprimé comme suit :

$$h = \left( \frac{3\Gamma \mu_L}{\rho_L \cdot g \sin \alpha} \right)^{1/3} \quad (4-19)$$

Du fait que l'épaisseur du film liquide varie en fonction du nombre de Reynolds et de la position géométrique de la plaque on introduit un nombre à dimension linéaire ( ); qui s'exprime:

$$N_2 = \left( \frac{\mu_L^2}{g \rho_L^2} \right)^{1/3} \quad \text{exprimer en unité : m.}$$

D'où l'expression de "h" s'écrit :

$$h = 0,9085 Re^{1/3} N_2 \sin \alpha^{-1/3} \quad (4-20)$$

Exprimons le coefficient  $D_{AB}$  en  $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}$  qui est déterminé par la relation suivante :

$$\delta_{AB} = D_{AB} \cdot \rho_L \cdot M_A \quad (4-21)$$

$\rho_L$  : Masse volumique du liquide

$M_A$  : Masse moléculaire du soluté "A" Gaz .

EN introduisant l'équation (4-20) et (4-21) dans l'équation (4-18)

on aura:

$$\frac{\beta N_2}{\delta_{AB}} = 0,725 \left( \frac{4\Gamma}{\mu_L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{m^* \mu_L}{\delta_{AB}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{N_2}{L} \right)^{1/2} \cdot (\sin \alpha)^{1/6} \quad (4-22)$$

$$m^* = \frac{M_A}{M_B}$$

$M_A$ : Masse moléculaire du gaz "A" diffusant .

$M_B$ : Masse moléculaire du liquide .

$\beta$  : Coefficient d'échange de matière de la phase liquide  
Exprimé en :  $\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

L'équation (4-22) s'écrit de la manière suivante:

$$Sh'_e = K \cdot Re'^a \cdot Sc^b \cdot \left( \frac{N_2}{L} \right)^c \cdot \sin^d \alpha$$

OÙ:

$Sh'$ : Le nombre de Sherwood équivalent

$Re'$ : Le nombre de Reynolds

$Sc$ : Le nombre de Schmit

$K$  : Constante .

5:1:

La cellule est munie d'un système où on fixe un thermomètre .

5: 1: 2: 1: 2: ZONE D'ABSORPTION :

Elle est fermée de dessus , la fermeture de la zone des côtés latéraux se fait par deux parois identiques , démontables ; qui sont représentés sur la figure ( 8 ) .

Les dimensions de cette zone sont :

Longueur 1, 00 m

L'introduction du gaz dans cette zone se fait par un tubulaire muni d'un système où l'on place un thermomètre .

5:1:2:1:3: ZONE DE SORTIE DU LIQUIDE :

At ferme

Elle est de dessus par une paroi démontable dont le dessin de définition est donné sur la figure ( 5 ) .

5:1:2:2: BAC D'ALIMENTATION:

Il a un volume de 30 litres ouvert à l'atmosphère , muni d'un déversoir , pour éviter les perturbations du débit d'alimentation de notre système .

5 : 1: 2: 3: BAC DE SATURATION:

C'est un parallélépipède rectangle , fermé à l'atmosphère , ses dimensions sont les suivantes :

- Longueur 15cm
- Largeur 15cm
- Hauteur 17cm

L'introduction et la sortie du gaz dans ce bac se fait - font par des tubulaires collés au bac ; qui sont confectonnés dans le plexiglas .

Page: fait partie de la partie expérimentale

Partie - expérimentale

CHAPITRE V  
PARTIE EXPERIMENTALE

5:1: MONTAGE EXPERIMENTAL :

Afin de réaliser nos expériences qui consisteront en une absorption du gaz  $CO_2$  par un film d'eau ; nous avons été amenés à réaliser un montage expérimental dans son ensemble schématisé par la figure (6) .

5:1:1: APPAREILLAGE:

- 1/ Canal d'absorption
- 2/ Bac d'alimentation
- 3/ Déversoir
- 4/ Vanne d'alimentation du canal d'absorption.
- 5 / Débitmètre liquide
- 6/ Bouteille à gaz comprimé ( $CO_2$ )
- 7 / Détendeur
- 8 / Compteur à gaz
- 9/ Réservoir de saturation du gaz  $CO_2$  par l'eau
- 10/ Tubulaire d'admission du gaz dans la zone d'absorption
- 11/ Tubulaire de sortie du gaz de la zone d'absorption
- 12/ Indicateur d'écoulement de gaz dans la zone d'absorption
- 13/,14/ Thermomètres (phase liquide )
- 15/,16/ Thermomètres ( phase gazeuse)
- 17/,18/ Levier variateur d'angle
- 19/ Vanne de vidange
- 20/ Vanne de prélèvement
- 21/ Tubulaire du déversoir
- 22/ Vanned'alimentation du bac
- 23/ Appuis fixés à la plaque
- 24/ Support du système



5 : 1 : 2 : DESCRIPTION DES ELEMENTS PRINCIPAUX  
DU MONTAGE EXPERIMENTAL :

5 : 1 : 2 : 1: CANAL D'ABSORPTION :

C'est un parallépipède rectangle confectonné dans le pléxiglas . Le dessin de définition de celui-ci est donné sur la figure ( 7 )

Les dimenssions sont :

Longueur = 150 cm

Largeur = 15 cm

Hauteur = 12 cm

- Il comprend essentiellement trois zones :

A : Zone d'introduction du liquide dans le canal

B : Zone d'absorption proprement dite

( contact  $CO_2$  et le film d'eau )

C : Zone de sortie du liquide

5 : 1 : 2 : 1 : 1: Zone d'introduction du liquide :

Elle est ouverte à l'air libre, sa longueur est 29 cm ( nous avons choisi cette dimenssion pour répondre dans le mieux aux conditions théoriques de l'écoulement du film ). Dans cette zone le liquide est introduit sous forme d'un film avec la vitesse de l'écoulement complètement formée. Le liquide provenant du bec d'alimentation est admis à cette zone par une cellule de forme parallépipède rectangle de dimenssions suivantes :

Longueur = 15 cm

Largeur = 3 cm

Hauteur = 5 cm

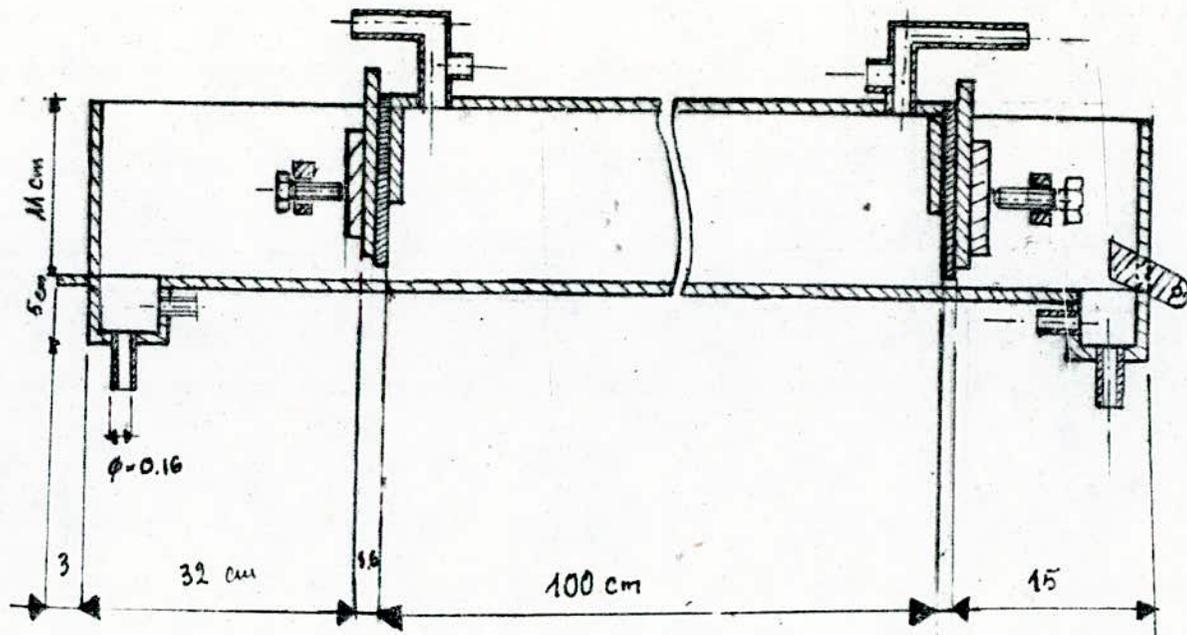
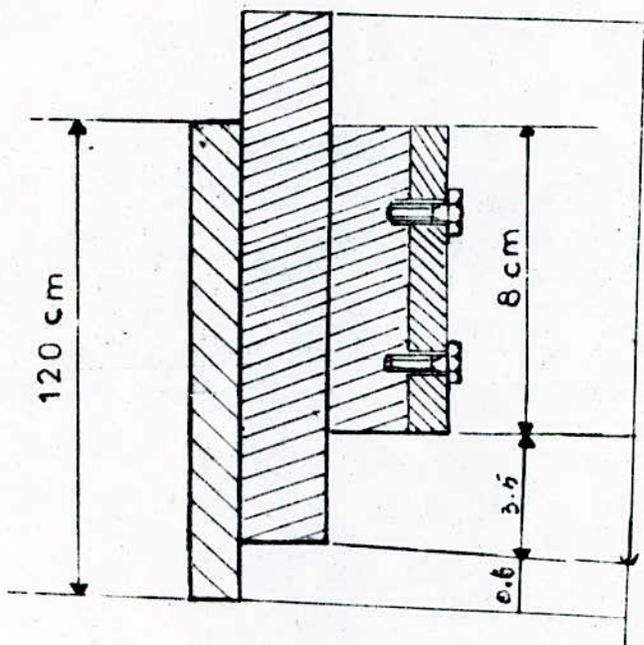


Figure (7)

COUPE LONGITUDINALE

DU

CANAL D'ABSORPTION



COUPE LONGITUDINAL DE LA PARROI  
DU CANAL D'ABSORPTION

Figure



CUIVRE



PLEXYGLACE



MATIERE PLASTIQUE

5:1:2:3: SUPPORT DU CANAL :

C'est un cadre rectangle en bois dans lequel nous avons fixé d'une part les leviers variateurs d'angles et d'autre part le système d'articulation de la plaque . Ce cadre est fixé d'un support à pieds métalliques , muni d'un système à régulation de la position horizontale par des vis et écrous soudés aux extrémités de chaque pied métallique .

5:1:3: PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT DU MONTAGE EXPERIMENTAL:

Issue de la vanne ( 22 ) , l'eau de ville est envoyée dans le bac d'alimentation de notre système d'où elle est dirigée vers le canal d'absorption , le débit liquide est contrôlé par le débitmètre , le réglage ainsi que la fermeture de la zone d'absorption se feront par des parois une fois qu'elles sont réglées sur le film d'eau , en les serrant contre les chicanes collées sur les côtés latéraux de la zone d'absorption et qu'ils limitent la zone d'absorption à l'aide des vis , montrés sur le dessin ( 7 ) .

Le gaz provenant de la bouteille passe d'abord dans le bac de saturation où il est envoyé après dans la zone d'absorption.

5 : 2 : ESSAIS ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans cette partie on se propose d'effectuer une serie d'essais d'absorption du gaz comprimé ( $CO_2$ ) par un film liquide d'eau, pour différentes positions géométriques d'inclinaisons du canal d'absorption et différents débits du liquide dans le but de :

A/ Déterminer le coefficient de transfert de matière du film liquide et de comparer les résultats obtenus aux résultats par la théorie.

B/ Déterminer une relation empirique reliant le coefficient de transfert de matière du film liquide aux conditions opératoires à savoir :

- Le débit spécifique du liquide.
- La pente du canal d'absorption.

5 : 2 : 1 : ESSAIS D'ABSORPTION

5 : 2 : 1 : MODE OPERATOIRE :

L'installation utilisée est représentée par le schéma ( 6 ). Cette étude a été précédée par l'étalonnage du débitmètre liquide dont les résultats et la courbe sont donnés en annexe(I). Pour nos essais d'absorption, nous avons adopté le mode opératoire suivant :

- Régler la position du canal (1) à l'aide de l'un des leviers(17) ou (18) selon la pente désirée, en positionnant symétriquement le levier sur l'appui d'angle.
- Remplir d'eau le bac d'alimentation (2)
- Régler l'écoulement dans le canal (1) à partir du débitmètre liquide (5) et la vanne (4).

- Fermer la zone en moyen des parois (8) et (9) dans le film d'eau.
- Couvrir la zone (C) du canal.
- Ouvrir la vanne (7) en réglant l'écoulement du gaz pour un débit voulu, la lecture se fait sur le compte à gaz (8).
- Assurer qu'il y ait un écoulement de gaz au moyen de l'incateur (8).
- Au moment où l'écoulement des deux phases  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  sera établi (régime permanent) dans la zone d'absorption.
- Noter les températures des deux phases entrée et sortie et la pression atmosphérique.
- Prélever des échantillons liquides pour l'analyse au niveau de la vanne (20) ( sortie du liquide), au niveau du tubulaire (21) (entrée du liquide).
- Refaire les expériences pour différents débits liquide à un angle d'inclinaison de la plaque donné.

5 : 2 : 1 : 2 : METHODE D'ANALISE DES ECHANTILLONS :

Pour éviter la désorption du  $\text{CO}_2$  à partir de l'échantillon de la solution prélevée à la sortie de la zone d'absorption dans l'air atmosphérique, nous avons adopté la méthode d'analyse volumétrique indirecte, qui consiste à ajouter immédiatement une quantité d'une solution soude en excès au volume de l'échantillon prélevé puis faire le titrage de la solution finale avec une solution d'acide chloridrique en présence d'un indicateur phénalpthaleine.

5:2:2: RESULTATS EXPERIMENTAUX :

5:2:2:1: Détermination du temps nécessaire à l'obtention du régime permanent.

Nous procédons comme il a été cité au mode opératoire, nous opérons sous les conditions suivantes .

$$G_{CO_2} = 1620 \quad \text{dm}^3/\text{h}$$

$$\sin \alpha = 0,355$$

$$L = 41,32 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$N_{HCL} = 0,110 \quad (\text{Normalité})$$

$$N_{NaOH} = 0,101 \quad (\text{Normalité})$$

$$T_L = 24 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Température moyenne du liquide de l'entrée et sortie})$$

$$V_{2NaOH} = 20 \text{ ml} \quad (\text{Volume de soude ajouté à l'échantillon prélevé})$$

$$\bar{V}_{2HCL} = 18,5 \text{ ml} \quad (\text{Volume moyen de Hcl nécessaire pour titrer } V_{2NaOH})$$

-Pour déterminer le volume de la solution de soude soit  $V_{1NaOH}$  nécessaire pour titrer le produit de l'absorption on le calcule par la relation suivante :

$$V_{1NaOH} = V_{2NaOH} - V_{\text{excès, NaOH}} \quad (5-1)$$

Avec :

$$V_{\text{excès, NaOH}} = V_{1HCL} \cdot \frac{N_{HCL}}{N_{NaOH}} \quad (5-2)$$

$V_{1HCL}$  : le volume de la solution d'acide HCL utilisée pour titrer la solution finale ( produit de l'absorption + quantité de NaOH, ajoutée)

Les résultats de l'analyse sont regroupés dans dans le tableau suivant :

Tableau n° 1

Temps (mn)	volume de l'échantillon (ml)	V <sub>1HCL</sub> (ml)	V <sub>1NaOH</sub> (ml)
5	130	14,2 ; 13,9	4,53; 4,86
10	130	13,7 ; 13,6	5,07; 5,18
15	130	12,2 ; 13,1	6,71; 5,84
25	130	11,7 ; 11,5	7,25 ; 7,47
30	130	10,8 ; 11,1	8,23 ; 7,91
35	130	9,6 ; 9,5	9,54; 9,65
45	130	9,5 ; 9,5	9,65 ; 9,65
55	130	9,7 ; 9,5	9,41 ; 9,65

Nous remarquons qu'après 45mn nous atteignons le régime permanent. Dans nos essais d'absorption nous ne prélevons nos échantillons qu'au bout de 60mn pour être sûr que le régime permanent est atteint. Nous estimons la validité du temps ainsi déterminé pour les autres conditions opératoires à savoir: l'inclinaison de la plaque, le débit spécifique du liquide.

5:2:2:2: METHODE DE CALCUL DU COEFFICIENT EXPERIMENTAL DE TRANSFERT DE MATIERE DU FILM LIQUIDE

Faisons un bilan de matière en constituant " A " gazeux sur toute la surface de contact gaz-liquide soit  $A'$ , en écrivant que la quantité de substance de "A" transférée de la phase gazeuse à travers la surface d'échange par unité de temps égale la quantité de substance en A transportée par le film liquide par unité de temps .

En choisissant comme force motrice du processus :

la moyenne logarithmique de la différence de rapport molaire des constituants, ainsi le bilan s'écrit :

$$G'_A = \beta A' (\Delta X_A)_{L_n} = L' m' (X_{AL} - X_{AO}) \quad (5-3)$$

Avec :

$$\Delta X_A = \frac{(X_{Ai} - X_{AO}) - (X_{Ai} - X_{AL})}{L_n \frac{X_{Ai} - X_{AO}}{X_{Ai} - X_{AL}}} \quad (5-4)$$

En remplaçant  $(\Delta X_A)_{L_n}$  par son expression dans (5-3)

$$\beta = \frac{L' m' L_n}{A'} \cdot \frac{X_{Ai} - X_{AO}}{X_{Ai} - X_{AL}} \quad (5-5)$$

$\beta$  : Le coefficient de transfert de matière du film .

$L'$  : débit massique du liquide .

$A'$  : surface de contact gaz - liquide .

$m'$  : rapport molaire ( $CO_2 - H_2O$ )

5:2:2:3: EXEMPLE DE CALCUL

Calculons les coefficients de transfert de matière théorique et expérimental du film liquide .

Faisons un calcul pour la première ligne du tableau ( 3 ) .

Apartir de la relation ( 4-22 )

$$\frac{\beta_{\text{th}}}{\delta_{\text{AB}}} = 0,725 \left( \frac{4l}{\mu_L} \right)^{1/3} \left( \frac{\nu^* \mu_L}{\delta_{\text{AB}}} \right)^{1/2} \left( \frac{V_L}{L} \right)^{1/2} (\sin \alpha)^{1/6}$$

Que l'on peut écrire de la façon suivante .

$$\beta = 0,725 (Re')^{1/3} (Sc)^{1/2} (\sin \alpha)^{1/6} \cdot \left( \frac{V_L}{L} \right)^{1/2} \frac{\delta_{\text{AB}}}{N_2}$$

Calcul de Re'

$$Re' = \frac{4F}{\mu_L}$$

La température moyenne du liquide entre l'entrée et la sortie

$$\bar{T}_L = \frac{T_{e1} + T_{s1}}{2} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Apartir du tableau (N°2) et (N°3) Annexe II

on interpole les valeurs des propriétés de l'eau et les propriétés physico-chimiques du système (CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O)

Soit :

$$\begin{aligned} \mu_L &= 0,9142 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s} \\ \rho_L &= 997,33 \text{ kg/m}^3 \\ (p_{\text{H}_2\text{O}})_i &= 22,38 \text{ mmHg} \\ N_2 &= 44,10 \cdot 10^{-6} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\Gamma = \frac{\dot{V} \rho_L}{b} = \frac{L'}{b} = \frac{74,79 \cdot 10^{-3}}{0,15} = 49,86 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

D'où

$$Re' = \frac{4 \cdot 49,86 \cdot 10^{-2}}{0,9142 \cdot 10^{-3}} = 2181,80$$

Calcul du nombre de Schmidt :

$$Sc = \frac{m' \cdot \mu_L}{\delta_{AB}} \quad m' = \frac{M_A}{M_B} \quad m' = \frac{44}{18}$$

Déterminons le coefficient de diffusion dynamique à  $T_L = 24^\circ\text{C}$

$$\delta_{AB} = D_{AB, 24^\circ\text{C}} \cdot \rho_L \cdot m'$$

Calculons  $D_{AB, 24^\circ\text{C}}$  par cette expression

$$D_{AB, 24^\circ\text{C}} = D_{AB, 20^\circ\text{C}} \cdot \frac{T_{24^\circ\text{C}} \cdot \mu_{20^\circ\text{C}}}{T_{20^\circ\text{C}} \cdot \mu}$$

$$D_{AB, 24^\circ\text{C}} = 1,769 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{297}{273} \cdot \frac{0,9142 \cdot 10^{-3}}{1,005 \cdot 10^{-3}}$$

$$D_{AB, 24^\circ\text{C}} = 1,961 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\delta_{AB} = \left( 1,961 \cdot 10^{-9} \cdot 997,33 \cdot \frac{44}{18} \right) \text{ kg/m} \cdot \text{s} \quad ; \quad \delta_{AB} = 4,781 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$Sc = \frac{m' \cdot \mu_L}{\delta_{AB}} = \frac{44}{18} \cdot \frac{0,9142 \cdot 10^{-3}}{4,781 \cdot 10^{-6}}$$

$$Sc = 467,32$$

Par interpolation à partir du tableau (2) Annexe II

$$T_L = 24^\circ\text{C} \quad N_L = 44,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$\sin \alpha = 0,047$  ,  $L = 1m$

D'ou finalement

$$\beta_{th} = 0,725(2181,80)^{1/3} \cdot (467,32)^{1/2} \cdot \left( \frac{44,10 \cdot 10^{-6}}{10} \right)^{1/2} (0,047)^{1/4}$$
  
$$\beta_{th} = 87,92 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

- Calcul du coefficient experimental de transfert de matiere  
du film liquide .

D'après la relation (5-5)

$$\beta = \frac{L'}{A} \cdot m \cdot \ln \frac{X_{A1} - X_{A0}}{X_{A1} - X_{A1}}$$

$A' = 0,15\pi^2$

$L' = 74,79 \cdot 10^3$

- Calcul du rapport molaire ( $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ ) à l'interface gaz-liquide

Appliquons la loi d'Henry qui s'écrit comme suit :

$$P_{A1} = E \cdot X_{A1} \quad (5-6)$$

$X_{A1}$ : Fraction molaire de  $A_1$  à l'interface gaz-liquide

$$X_{A1} = \frac{n_{A1}}{n_{A1} + n_B} \quad (5-7)$$

en considérant que le nombre de moles du gaz à l'interface est très inférieur par rapport au nombre du constituant inerte ( l'eau)

$n_{A1} \ll n_B$  D'ou on aproximise  $X_{A1} = \frac{n_{A1}}{n_{A1} + n_B} \approx \frac{n_{A1}}{n_B}$

Etou on écrit

$$X_{s1} = X_{A1}$$

D'où l'équation (6-6) s'écrit :

$$P_{A1} = H X_{A1}$$

$$P_{A1} = P_{atm} - (P_{H_2O})_1 - P_I$$

$(P_{H_2O})$  : Pression de la vapeur saturante à la température moyenne du liquide ;

$P_I$  : Pression des impuretés

On considère que le gaz est pur  $P_I = 0$

$$\bar{T} = 24^\circ C \quad (P_{H_2O})_1 = 22,38 \text{ mm Hg}$$

$$P_{atm} = 763 \text{ mmHg}$$

$$P_{A1} = 763 - 22,38 = 740,62 \text{ mmHg}$$

Apartir du tableau N° 3, (annexe II) on interpole la constante H.

$$\text{Soit } H = 1,205 \cdot 10^6 \text{ mmHg}$$

D'où finalement

$$X_{A1} = \frac{740,62}{1,205 \cdot 10^6} = 6,142 \cdot 10^{-4} \quad \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$$

-Calcul de  $X_{A0}, X_{A1}$

On se propose de les calculer par la relation (6), qui s'exprime comme suite.

$$X_{A0} = \frac{H_{HCL}^{18} (V_{2HCL} - V_{1HCL})}{1000 \cdot C_i \cdot V_{ach}}$$

$$X_{A0} = \frac{0,122 \cdot 18 (17,8 - 17,4)}{1000 \cdot 0,99733 \cdot 130}$$

$$X_{A0} = 6,750 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$$

-41-

De la même manière on calcule  $X_{Al}$

$$X_{Al} = \frac{0,122 \cdot 18 (17,8 - 12,7)}{1000 \cdot 0,99733 \cdot 130} = 0,863 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kmol } CO_2}{\text{kmol } H_2O}$$

D'où finalement

$$\beta_{up} = \frac{74,79 \cdot 10^{-3}}{0,15} \ln \frac{6,142 \cdot 10^{-4} - 6,780 \cdot 10^{-6}}{6,142 \cdot 10^{-4} - 0,863}$$

$$\beta_{exp} = 171,01 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

Ce Tableau résume les valeurs d'analyse  
de l'eau à l'entrée dans la zone d'absorption  
pour les huit essais que nous avons effectués

ESSAI N°	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{\text{ech}}$ (ml)	130,00	120,00	120,00	130,00	140,00	140,00	130,00	100,00
$V_{\frac{1}{2}\text{HCL}}$ (ml)	17,40	17,20	17,50	15,60	18,10	17,30	17,20	18,10
$V_{\frac{1}{2}\text{HCL}}$ (ml)	17,60	17,00	17,30	15,40	17,60	17,40	17,70	17,70
$V_{\frac{1}{3}\text{HCL}}$ (ml)	17,20	17,20	17,40	15,80	18,00	17,20	17,80	18,20
$\bar{V}_{\frac{1}{2}\text{HCL}}$ (ml)	17,40	17,13	17,40	15,60	17,90	17,30	17,56	18,00
$V_{\text{NaOH}}$ (ml)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
$\bar{V}_{\frac{1}{2}\text{HCL}}$ (ml)	17,80	17,50	17,80	16,00	18,50	17,90	17,90	18,50
$N_{\text{HCL}}$	0,122	0,126	0,126	0,125	0,110	0,110	0,103	0,110
$N_{\text{NaOH}}$	0,110	0,114	0,114	0,110	0,101	0,101	0,092	0,101
$X_{\text{AO}} \frac{6 \text{ Kmol Ca}}{10 \text{ Kmol HO}_2}$	6,780	6,633	6,500	6,600	7,801	9,217	6,611	6,204

Tableau (2)

ESSAI N° 2

Conditions opératoires et Les résultats

$S_{max} = 0,047$

$(\alpha = 2,69^\circ)$

$G_{CO_2} = 1350 \frac{dm^3}{h}$

$V_{ech} = 130 \text{ ml}$

$N_{HCL} = 0,122$

$X_{AO} = 6,78 \cdot 10^{-6} \frac{kmol CO_2}{kmol H_2O}$

$P_{atm} = 763 \text{ mmHg}$

$V_{2HCL} = 17,8 \text{ ml}$

$A' = 0,15 \text{ m}^2$

$N_{NaOH} = 0,110$

$N_i = 44,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

$V_{NaOH} = 20 \text{ ml}$

$L \cdot 10^3$ Kg s <sup>-1</sup>	$V_{HCL}$ ml	$T_{eL}$ °C	$T_{sL}$ °C	$T_{eG}$ °C	$T_{sG}$ °C	$X_{AL} \cdot 10^6$ $\frac{kmol CO_2}{kmol H_2O}$	$\Gamma \cdot 10^2$ Kg m <sup>-3</sup>	Re	Sc	$\beta_{theo} \cdot 10^3$ Kg m <sup>-2.1</sup> s <sup>-1</sup>	$\beta_{exp} \cdot 10^3$ Kg m <sup>-2.1</sup> s <sup>-1</sup>
74,79	12,7	24	24	22,8	23,5	0,863	49,86	2181,80	467,33	87,92	171,04
	12,0	24	24	22,8	23,5	0,924	49,86	2181,80	467,33	87,92	185,05
62,33	11,8	24	24	23,0	23,5	1,016	41,55	1818,22	467,33	82,73	172,27
	11,4	24	24	23,0	24,0	1,084	41,55	1818,22	467,33	82,73	185,83
49,37	11,0	24	24	23,2	24,0	1,152	32,91	1440,04	467,33	76,56	158,07
	10,4	24	24	23,3	24,0	1,253	32,91	1440,04	467,33	76,56	174,50
36,90	10,7	24	24	23,5	24,5	1,304	24,60	1076,38	467,33	69,45	136,73
	10,2	24	24	23,5	24,5	1,287	24,60	1076,38	467,33	69,45	134,62
30,92	9,9	24	24	24,5	25,0	1,338	20,61	901,83	467,33	65,50	118,12
	9,8	24	24	24,5	25,0	1,355	20,61	901,83	467,33	65,50	119,90
24,43	8,8	24	24	24,5	25,5	1,558	16,29	712,73	467,33	60,56	111,97
	3,6	24	24	24,5	25,5	1,621	16,29	712,73	467,33	60,56	117,48
19,45	7,4	24	24	24,6	26,0	1,762	12,97	581,81	467,33	56,57	103,57
	7,0	24	24	24,6	26,0	1,829	12,97	581,81	467,33	56,57	108,75

Tableau (3)

Conditions opératoires et résultats

$$\sin \alpha = 0,111$$

$$(\alpha = 6,37^\circ)$$

$$G_{CO_2} = 1230 \text{ dm}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{éch}} = 120 \text{ ml}$$

$$N_{HCl} = 0,126$$

$$X_{A0} = 6,633 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$$

$$P_{\text{atm}} = 763,6 \text{ mm Hg}$$

$$V_{2HCl} = 17,5 \text{ ml}$$

$$A = 0,15 \text{ m}^2$$

$$N_{NaOH} = 0,114 \quad V_{2NaOH} = 20 \text{ ml}$$

$$N_2 = 43,79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$L' \cdot 10^3$ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{HCl}$ ml	$T_{eL}$ °C	$T_{sL}$ °C	$T_{eG}$ °C	$T_{sG}$ °C	$X_{AL} \cdot 10^4$ $\frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$	$\Gamma \cdot 10^2$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	Re	Sc	$\beta_{\text{théo}} \cdot 10^3$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\beta_{\text{exp}} \cdot 10^3$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
74,79	13,2	24,5	24,5	23,5	25,0	9881	49,86	2203,39	457,12	102,22	178,39
	13,1	24,5	24,5	23,5	25,0	1004	49,86	2203,39	457,12	102,22	207,03
63,32	12,2	24,5	24,5	23,5	25,0	1194	42,21	1865,87	457,12	96,73	214,73
	12,9	24,5	24,5	23,5	25,0	1061	42,21	1865,87	457,12	96,73	186,96
51,85	12,6	24,5	24,5	24,5	25,1	1120	34,56	1529,95	457,12	90,52	163,11
	11,3	24,5	24,5	24,5	25,5	1232	34,56	1529,95	457,12	90,52	132,45
37,91	11,8	24,5	24,5	24,5	25,5	1288	25,27	1101,87	457,12	81,15	140,59
	10,0	24,5	24,5	24,5	25,5	1478	25,27	1101,87	457,12	81,15	165,64
30,91	10,3	24,5	24,5	25,0	25,5	1421	20,60	910,91	457,12	76,15	128,84
	10,9	24,5	24,5	25,0	25,5	1310	20,60	910,91	457,12	76,15	116,95
24,93	9,8	24,5	24,5	25,0	25,5	1516	16,62	734,53	457,12	70,89	112,30
	8,5	24,5	24,5	25,0	25,5	1763	16,62	734,53	457,12	70,89	134,97
18,95	7,5	24,5	24,5	25,0	25,5	1952	12,63	558,29	457,12	64,69	116,45
	6,9	24,5	24,5	25,0	25,5	2065	12,63	558,29	457,12	64,69	125,05

Conditions opératoires et résultats

$S_{ina} = 0,138$

$(\alpha = 7,93^\circ)$

$G_{CO_2} = 1320 \text{ dm}^3/\text{h}$

$V_{\text{écl}} = 120 \text{ ml}$

$N_{HCL} = 0,126$

$X_{AO} = 6,50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$

$P_{\text{atm}} = 764 \text{ mmHg}$

$V_{2HCL} = 17,8 \text{ ml}$

$A = 0,15 \text{ m}^2$

$N_{NaOH} = 0,114$

$\lambda_2 = 43,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

$V_{2NaOH} = 20 \text{ ml}$

$L \cdot 10^3$ $\text{kg s}^{-1}$	$V_{1HCL}$ ml	$T_{\text{el}}$ °C	$T_{\text{sl}}$ °C	$T_{\text{ca}}$ °C	$T_{\text{sa}}$ °C	$X_{AL} \cdot 10^4$ $\frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$	Re	$\Gamma \cdot 10^2$ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	Sc	$\beta_{\text{theo}} \cdot 10^3$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\beta_{\text{exp}} \cdot 10^3$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
74,79	13,0	25	25	24,6	26,0	0,909	2231,88	49,86	445,21	106,98	200,08
	12,2	25	25	24,6	26,0	1,057	2231,88	49,86	445,21	106,98	236,24
62,33	11,2	25	25	24,7	26,1	1,247	1859,83	41,55	445,21	100,37	236,93
	11,3	25	25	24,7	26,3	1,226	1859,83	41,55	445,21	100,37	232,53
54,34	11,5	25	25	25,2	26,5	1,333	1621,42	36,23	445,21	96,18	222,81
	10,1	25	25	25,2	26,5	1,628	1621,42	36,23	445,21	96,18	228,82
31,41	9,4	25	25	25,4	26,5	1,597	937,23	20,94	445,21	81,20	198,83
	8,7	25	25	25,4	26,6	1,861	937,23	20,94	445,21	81,20	190,69
24,93	9,8	25	25	25,6	26,6	1,692	743,87	16,62	445,21	74,18	134,97
	9,3	25	25	25,7	26,6	1,798	743,87	16,62	445,21	74,13	145,17
18,45	7,4	25	25	25,6	26,7	1,963	550,52	12,30	445,21	66,21	119,58
	8,0	25	25	25,6	26,7	1,861	550,52	12,30	445,21	66,21	123,26

Conditions opératoires et résultats

$S_{max} = 0,168$

$(\alpha = 9,67^\circ)$

$G_{CO_2} = 1650 \text{ dm}^3/\text{h}$

$V_{sch} = 130 \text{ ml}$

$N_{HCl} = 0,125$

$X_{A0} = 6,60 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kmol } CO_2}{\text{kmol } H_2O}$

$P_{atm} = 763,4 \text{ mmHg}$

$V_{2HCl} = 16 \text{ ml}$

$A = 0,15 \text{ m}^2$

$N_{NaOH} = 0,101$

$N_2 = 43,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

$V_{2NaOH} = 20 \text{ ml}$

$L \cdot 10^3$ $\text{g s}^{-1}$	$V_{2HCl}$ ml	$T_{el}$ $^\circ\text{C}$	$T_{ex}$ $^\circ\text{C}$	$T_{es}$ $^\circ\text{C}$	$T_{ea}$ $^\circ\text{C}$	$X_{A0} \cdot 10^6$ $\frac{\text{kmol } CO_2}{\text{kmol } H_2O}$	$Re$	$\Gamma \cdot 10^2$ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	$Sc$	$\beta_{H_2O} \cdot 10^3$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg m}^3 \text{s}}$	$\beta_{HCl} \cdot 10^3$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg m}^3 \text{s}}$
72,79	10,1	25	25	24,1	25,1	1021	2171,97	48,53	445,21	109,55	221,33
	10,2	25	25	24,1	25,3	1007	2171,97	48,53	445,21	109,55	218,03
59,85	8,8	25	25	24,2	25,5	1245	1517,35	33,90	445,21	97,21	199,03
	8,4	25	25	24,2	25,5	1326	1517,35	33,90	445,21	97,21	207,42
38,89	7,8	25	25	24,2	25,9	1415	1160,45	25,92	445,21	83,89	170,91
	8,5	25	25	24,8	25,9	1302	1160,45	25,92	445,21	83,89	155,37
30,91	7,4	25	25	24,8	25,9	1501	922,39	20,61	445,21	82,24	145,46
	8,1	25	25	24,8	25,9	1371	922,39	20,61	445,21	82,24	131,00
24,92	6,7	25	25	25,3	26,5	1612	743,78	16,61	445,21	76,65	127,38
	6,9	25	25	25,0	26,4	1590	743,78	16,61	445,21	76,65	125,48
18,44	5,4	25	25	25,0	26,4	1844	550,40	12,29	445,21	69,33	110,83
	5,9	25	25	25,0	26,4	1736	550,40	12,29	445,21	69,33	103,06

Tableau (6)

Conditions opératoires et résultats

$\sin \alpha = 0,244$

$(\alpha = 14,12^\circ)$

$G_{CO_2} = 1560 \text{ dm}^3/\text{h}$

$V_{\text{éch}} = 140 \text{ ml}$

$N_{HCl} = 0,110$

$X_{A0} = 7,801 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$

$P_{\text{atm}} = 762,9 \text{ mmHg}$

$V_{2HCl} = 18,5 \text{ ml}$

$A = 0,15 \text{ m}^2$

$N_{NaOH} = 0,101$

$N_2 = 43,43 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

$V_{2NaOH} = 20 \text{ ml}$

$L \cdot 10^3$ $\text{kg s}^{-1}$	$V_{1HCl}$ ml	$T_{\text{cél}}$ °C	$T_{\text{gl}}$ °C	$T_{\text{ég}}$ °C	$T_{\text{sa}}$ °C	$X_{AL} \cdot 10^4$ $\frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$	$Re$	$\Gamma \cdot 10^2$ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	$Sc$	$\beta_{\text{théor}}$ $\frac{\text{kg m}^{-3}}{\text{kg m}^{-3}}$	$\beta_{\text{exp}}$ $\frac{\text{kg m}^{-3}}{\text{kg m}^{-3}}$
74,79	9,7	25	25	24,3	25,1	1251	2181,84	49,86	467,33	146,63	271,04
	10,9	25	25	24,3	25,1	1081	2181,34	49,86	467,33	146,63	227,82
67,80	9,2	25	25	24,6	25,7	1326	1977,68	45,20	467,33	111,96	263,44
	9,5	25	25	24,6	25,7	1278	1977,68	45,20	467,33	111,96	252,06
60,32	9,3	25	25	25,1	26,0	1305	1759,50	40,21	467,33	107,68	229,94
	8,8	25	25	25,1	26,0	1376	1759,50	40,21	467,33	107,68	245,04
39,38	8,2	25	25	25,4	26,0	1464	1148,69	26,25	467,33	93,42	172,42
	8,4	25	25	25,4	26,0	1433	1148,69	26,25	467,33	93,42	168,01
30,91	7,5	25	25	25,5	26,2	1561	910,59	20,61	467,33	86,15	146,32
	7,1	25	25	25,5	26,2	1604	910,59	20,61	467,33	86,15	151,26
18,45	4,8	25	25	25,5	26,3	1931	538,18	12,30	467,33	72,55	113,75
	2,7	25	25	25,5	26,3	2242	538,18	12,30	467,33	72,55	137,98

ESSAIS N°6

Conditions opératoires et résultats

$S_{ina} = 0,283$

$P_{atm} = 761,7 \text{ mmHg}$

$(\alpha = 16,4\%)$

$V_{2HCL} = 17,9 \text{ ml.}$

$G_{CO_2} = 1500 \text{ dm}^3/\text{h}$

$A = 0,15 \text{ m}^2$

$V_{ech} = 140 \text{ ml}$

$N_{NaOH} = 0,101$  ;  $V_{NaOH} = 20 \text{ ml}$

$N_{HCL} = 0,110$

$N_2 = 44,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

$X_{AO} = 9,217 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$

$L' \cdot 10^3$ $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{HCL}$ ml	$T_{el}$ °C	$T_{sc}$ °C	$T_{es}$ °C	$T_{ss}$ °C	$X_{Al} \cdot 10^4$ $\frac{\text{kmol Ca}}{\text{kmol H}_2\text{O}}$	$\Gamma \cdot 10^2$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Re	Sc	$\beta_{theo} \cdot 10^3$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\beta_{exp} \cdot 10^3$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
74,79	9,9	24	24	23,8	24,5	1,137	49,86	2181,86	467,33	118,52	231,37
	9,5	24	24	23,8	24,5	1,198	49,86	2181,86	467,33	118,52	246,34
62,33	8,6	24	24	24,2	24,5	1,325	42,21	1818,22	467,33	111,59	231,76
	8,2	24	24	24,2	24,5	1,375	42,21	1818,22	467,33	111,59	242,38
49,37	7,9	24	24	24,4	25,0	1,412	34,57	1440,04	467,33	103,24	198,26
	7,3	24	24	24,4	25,0	1,503	34,57	1440,04	467,33	103,24	213,92
36,90	6,9	24	24	24,4	25,5	1,566	25,27	1076,38	467,33	93,70	168,12
	6,4	24	24	24,4	25,5	1,632	25,27	1076,38	467,33	93,70	176,67
30,92	5,9	24	24	25,2	26,0	1,691	20,61	901,83	467,33	87,84	154,86
	5,7	24	24	25,2	26,0	1,732	20,61	901,83	467,33	87,84	159,52
24,53	4,9	24	24	25,2	26,2	1,833	16,62	712,73	467,33	81,65	145,28
	4,2	24	24	25,2	26,2	1,945	16,62	712,73	467,33	81,65	145,76

ESSAIS N°6

Conditions opératoires et résultats

$S_{in} = 0,283$

$P_{atm} = 761,7 \text{ mmHg}$

$(\alpha = 16,4\%)$

$V_{2HCL} = 17,9 \text{ ml}$

$G_{CO_2} = 1500 \text{ dm}^3/\text{h}$

$A = 0,15 \text{ m}^2$

$V_{ech} = 140 \text{ ml}$

$N_{NaOH} = 0,101$  ;  $V_{NaOH} = 20 \text{ ml}$

$N_{HCL} = 0,110$

$N_2 = 44,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

$X_{AO} = 9,217 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kmol H}_2\text{O}}$

$L' \cdot 10^3$ $\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{HCL}$ $\text{ml}$	$T_{el}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{sc}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{es}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{ss}$ $^{\circ}\text{C}$	$X_{Al} \cdot 10^4$ $\frac{\text{kmol Ca}}{\text{kmol H}_2\text{O}}$	$\Gamma \cdot 10^2$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Re	Sc	$\beta_{theo} \cdot 10^3$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\beta_{exp} \cdot 10^3$ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
74,79	9,9	24	24	23,8	24,5	1,137	49,86	2181,86	467,33	118,52	231,37
	9,5	24	24	23,8	24,5	1,198	49,86	2181,86	467,33	118,52	246,34
62,33	8,6	24	24	24,2	24,5	1,325	42,21	1818,22	467,33	111,59	231,76
	8,2	24	24	24,2	24,5	1,375	42,21	1818,22	467,33	111,59	242,38
49,37	7,9	24	24	24,4	25,0	1,412	34,57	1440,04	467,33	103,24	198,26
	7,3	24	24	24,4	25,0	1,503	34,57	1440,04	467,33	103,24	213,92
36,90	6,9	24	24	24,4	25,5	1,566	25,27	1076,38	467,33	93,70	168,12
	6,4	24	24	24,4	25,5	1,632	25,27	1076,38	467,33	93,70	176,67
30,92	5,9	24	24	25,2	26,0	1,691	20,61	901,83	467,33	87,84	154,86
	5,7	24	24	25,2	26,0	1,732	20,61	901,83	467,33	87,84	159,52
24,53	4,9	24	24	25,2	26,2	1,833	16,62	712,73	467,33	81,65	145,28
	4,2	24	24	25,2	26,2	1,945	16,62	712,73	467,33	81,65	145,76



$-\ln \beta_{exp}$   
 $-\ln \beta_{theo}$

+ Valeur théorique

o Valeur expérimentale

Graphique montrant l'écart  
entre les valeurs théoriques  
et les valeurs expérimentales

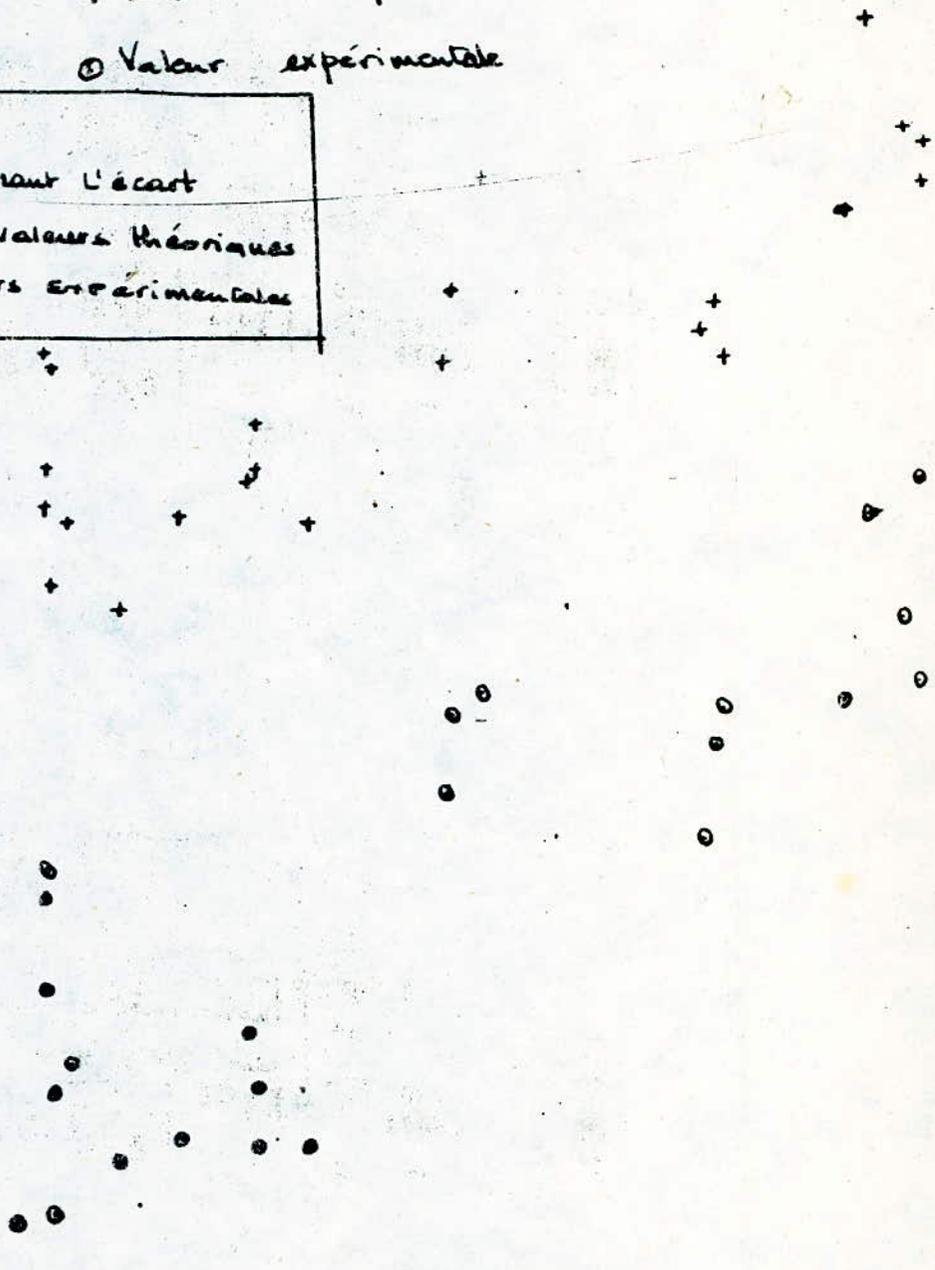
0,50

1,00

1,50

1,50

$-\ln \beta'$



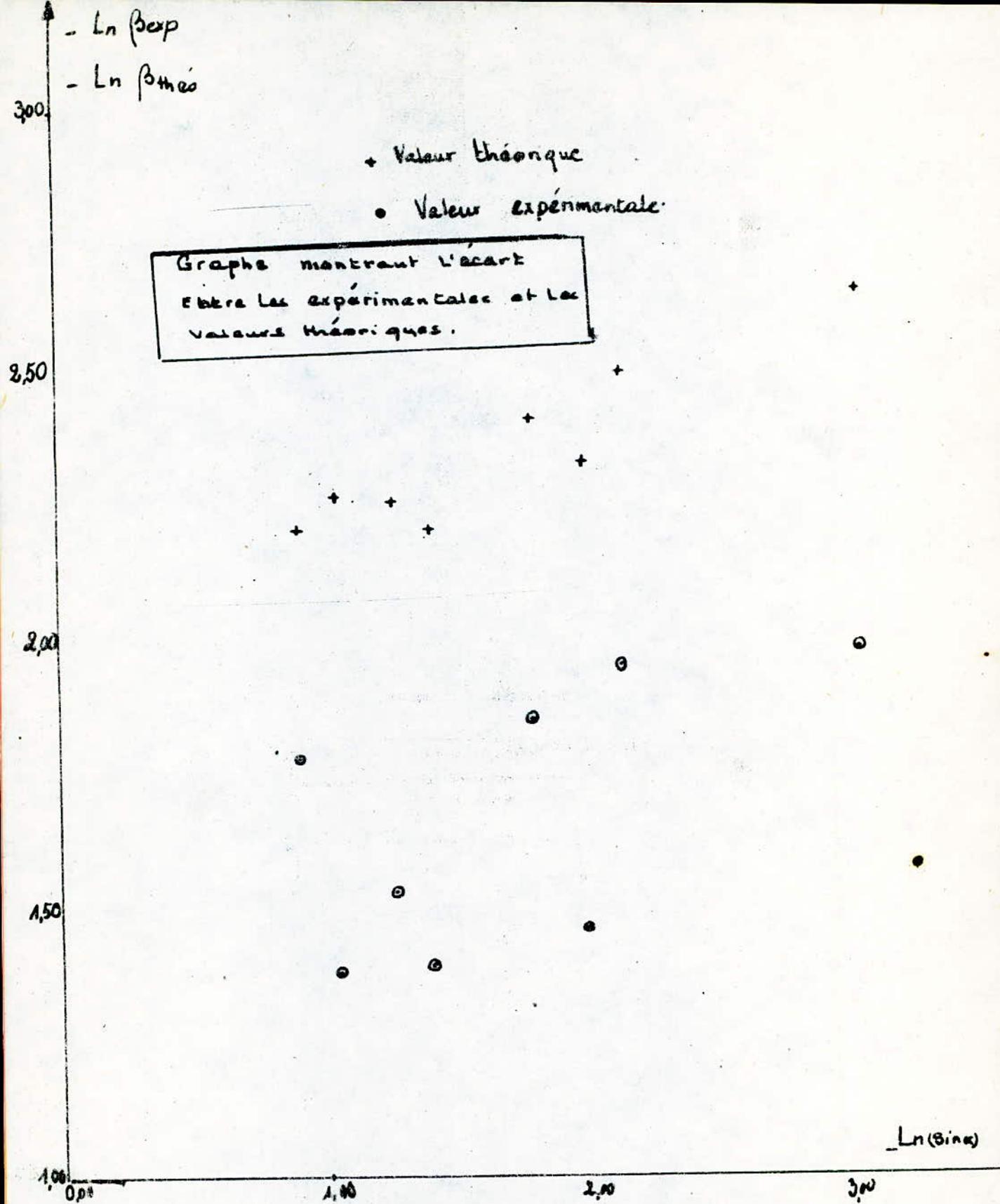
-  $\ln \beta_{exp}$

-  $\ln \beta_{theo}$

+ Valeur théorique

• Valeur expérimentale

Graphes montrant l'écart  
Entre les expérimentales et les  
valeurs théoriques.



51212: 4: RESULTATS THEORIQUES , EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS

---

Les résultats expérimentaux ainsi que les résultats théoriques calculés, pour les mêmes conditions opératoires sont consignés dans les tableaux numérotés de ( 2 ) , jusqu'au N° 10 .

Le tableau N°2 résume les résultats d'analyse de l'eau à l'entrée de la zone d'absorption ; du fait que la solubilité de  $CO_2$  atmosphérique est faible dans l'eau . On se propose alors de faire trois analyses pour chaque essai et nous prenons la valeur moyenne pour les calculs .

Nous signalons que l'obtention d'un film dans notre montage expérimental est pratiquement impossible pour les débits liquide inférieur à  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  .

- Aux cours de nos expériences nous avons constaté l'accumulation des bulles d'air à la surfaces liquide- solide ; ce qui prolonge certainement en plus des vagues existantes à la surface libre du film le temps d'obtention du régime permanent .

- A travers les résultats résumés dans les tableaux cités précédemment nous constatons que les coefficients de transfert de matière déterminés expérimentalement étaient toujours supérieurs à ceux calculés théoriquement et la différence est plus importantes aux débits liquide élevés .

Les explications que l'on peut donner à cette différence se résument dans les remarques suivantes :

- 1: L'équation de mouvement du liquide appliquée théoriquement ne décrit pas parfaitement l'écoulement du film, du fait que la surface n'est pas plane mais ondulée.
- 2: L'existence permanente des vagues à la surface libre du film entraîne un renouvellement de la surface de contact gaz-liquide ce qui augmente le flux de transfert de matière.
- 3: L'accumulation des bulles à la paroi solide entraîne aussi des obstacles conduisant à des phénomènes de turbulence dans le film liquide.

5:2:3: DETERMINATION D'UNE RELATION EMPIRIQUE

On se propose de déterminer une relation empirique de la forme :

$$\beta = K \cdot \Gamma^n (\sin \alpha)^m \quad (5-8)$$

$\beta$  : Coefficient de transfert de matière du film liquide

$\Gamma$  ; Débit massique du film liquide par unité de largeur de la plaque

$\alpha$  : L'angle d'inclinaison de la plaque

$K, n, m$ , sont des constantes à déterminer

5:2:3:1: PRINCIPE DE DETERMINATION DES CONSTANTES:

Nous disposons des valeurs expérimentales de  $\beta, \Gamma, \sin \alpha$  présentées dans les tableaux du N° ( 3 ) jusqu'au N° ( 10 )

pour chaque couple de  $\Gamma_1, (\sin \alpha)_1$  correspond une valeur  $\beta_i$

En écrivant l'équation ( 5-8 ) en termes logarithmiques pour une valeur donnée on a alors :

$$\ln \beta_i = \ln K + n \ln \Gamma_1 + m \ln (\sin \alpha)_1$$

En posant :

$$Y_1 = \ln \beta_i \quad (5-9)$$

$$A = \ln K \quad (5-10)$$

$$X1_1 = \ln \Gamma_1 \quad (5-11)$$

$$X2_1 = \ln (\sin \alpha)_1 \quad (5-12)$$

L'équation ( 5-8 ) s'écrit alors :

$$Y_1 = A + n X1_1 + m X2_1 \quad (5-13)$$

Nous appliquons la méthode des moindres carrés qui consiste à minimiser la fonction  $f(A, n, m)$ , qui s'exprime comme suit :

$$f(A, n, m) = \sum_{i=1}^{i=N} (Y_i - (A + nX1_i + mX2_i))^2 \text{ à minimiser.}$$

exprimons les dérivées partielles  $\frac{\partial f(A, n, m)}{\partial A}$  ,  $\frac{\partial f(A, n, m)}{\partial n}$   
 $\frac{\partial f(A, n, m)}{\partial m}$

On aura :

$$\frac{\partial f(A, n, m)}{\partial A} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} (Y_i - (A + nX1_i + mX2_i)) \quad (5-14)$$

$$\frac{\partial f(A, n, m)}{\partial n} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} X1_i (Y_i - (A + nX1_i + mX2_i)) \quad (5-15)$$

$$\frac{\partial f(A, n, m)}{\partial m} = -2 \sum_{i=1}^{i=N} X2_i (Y_i - (A + nX1_i + mX2_i)) \quad (5-16)$$

Développons les expressions (5-14) , (5-15) , (5-16)  
 et en les égalisant à zéro on aura le système suivant;

$$(5-20) \left\{ \begin{aligned} & \left[ \left( \sum_{i=1}^{i=N} Y_i \right) - A(N) - n \left( \sum_{i=1}^{i=N} X1_i \right) - m \left( \sum_{i=1}^{i=N} X2_i \right) \right] = 0 \quad (5-17) \\ & \sum_{i=1}^{i=N} X1_i Y_i - A \sum_{i=1}^{i=N} X1_i - n \sum_{i=1}^{i=N} X1_i^2 - m \sum_{i=1}^{i=N} X1_i X2_i = 0 \quad (5-18) \\ & \sum_{i=1}^{i=N} X2_i Y_i - A \sum_{i=1}^{i=N} X2_i - n \sum_{i=1}^{i=N} X1_i X2_i - m \sum_{i=1}^{i=N} X2_i^2 = 0 \quad (5-19) \end{aligned} \right.$$

Ainsi nous obtenons un système à trois inconnus que l'on peut résoudre facilement.

5.2.3.2: RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS.

En se limitant à notre cas le nombre d'expériences que nous avons faites est égale à 100.

$$(N=100)$$

Nous avons élaboré et exécuté un programme permettant le calcul des sommes et des produits du système d'équations précédemment proposé .

Nous exploitons les résultats de ce programme, (Annexe III)

le système ( 5-10 ) , s'écrit :

$$\begin{aligned} S1 - 100A - S2 n - S3m &= 0 \\ SP2 - S2A - SQ1n - SP3 &= 0 \\ SF1 - S3 A - SP3m - SQ2 &= 0 \end{aligned}$$

Qui se traduit par :

$$\begin{aligned} -177,4402 - 100,000 A + 127,8985 n + 164,9707 m &= 0 \\ 274,5664 - 127,8985A - 278,1329 n - 235,374 m &= 0 \\ 320,304 - 164,9707 A - 235,374 n - 411,6914m &= 0 \end{aligned}$$

Le système ainsi obtenu s'écrit sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{pmatrix} -100 & 127,8985 & 164,9707 \\ 127,8985 & -278,1329 & -235,374 \\ 164,9707 & -235,374 & -411,6914 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ n \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 177,4402 \\ -274,5664 \\ -320,304 \end{pmatrix}$$

On se propose de résoudre ce système par la méthode de CRAMER (méthode des déterminants)

$$A = \frac{\begin{vmatrix} 177,4420 & 127,8985 & 164,9707 \\ -247,5664 & -278,1329 & -235,374 \\ -320,304 & -235,374 & -411,6914 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -100 & 127,8985 & 164,9707 \\ 127,8985 & -278,1329 & -235,374 \\ 164,9707 & 235,374 & -411,6914 \end{vmatrix}} = \frac{1627061,50}{-3127965,186}$$

A = -0,520

$$n = \frac{\begin{vmatrix} -100 & 177,4402 & 164,9707 \\ 127,8985 & -274,5664 & -235,374 \\ 164,9707 & -320,304 & -411,6914 \end{vmatrix}}{-3127965,186} = \frac{-4365701,009}{-3127965,186}$$

n = 1,3957

$$m = \frac{\begin{vmatrix} -100 & 127,8985 & 177,4402 \\ 127,8985 & -278,1329 & -274,566 \\ 164,9707 & -235,374 & -320,304 \end{vmatrix}}{-3127965,186} = \frac{-506730,360}{-3127965,186}$$

m = 0,162

D'après l'équation ( 5-10 )

$$A = \ln K$$

$$A = -0,520$$

$$K = e^{-0,520} = 0,594$$

D'où la relation ( 5-1 ) s'écrit finalement

$$\beta = 0,594 \cdot r^{1,3957} \cdot (\sin \alpha)^{0,162} \quad (5-21)$$

Avec  $0,047 \leq (\sin \alpha) \leq 0,410$  ;  $1230 \cdot 10^{-2} \leq r \leq 52,88 \cdot 10^{-2} \frac{kg}{m.s}$

INTERPRETATION :

La relation ainsi déterminée montre que le coefficient de transfert de matière du film liquide augmente avec le débit liquide, ce qui est en accord avec nos résultats expérimentaux ainsi que les résultats prévus par la théorie; et il augmente aussi avec la pente d'inclinaison. On constate aussi qu'il <sup>est</sup> ~~est~~ <sup>croît</sup> plus avec la pente en comparaison avec ce qui ~~est~~ <sup>est</sup> prévu par la théorie du fait que l'exposant dans la relation ( 5.21 ) est plus grand à ~~celui~~ qui figure dans la relation théorique ( 5-22 )

CONCLUSION :

Au cours de notre travail nous avons réalisé un montage expérimental dont nous avons effectué nos essais expérimentaux de transfert de matière qui consistaient en absorption .  
 Nous avons déterminé les coefficients d'échange de matière du film liquide  $\beta_{exp}$  et  $\beta_{théo}$  et nous avons vérifié que le coefficient  $(\beta_{exp})$  de transfert de matière du film liquide croit avec le débit liquide ainsi que la pente du canal d'absorption .

Pour interpréter nos résultats expérimentaux nous avons déterminé une corrélation reliant le coefficient de transfert de matière  $(\beta_{exp})$  du film liquide aux conditions opératoires par :

$$\beta_{exp} = 0,594 \Gamma^{1,3957} (S \sin \alpha)^{0,162}$$

Dont le domaine de validité est :

$$0,047 \leq S \sin \alpha \leq 0,440$$

$$12,30 \cdot 10^{-2} \leq \Gamma \leq 52,88 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

La comparaison des résultats expérimentaux aux résultats théoriques montre que le coefficient de transfert de matière du film liquide déterminé expérimentalement était toujours supérieur à celui prévu théoriquement dont nous avons rapporté quelques explications .

Ce travail peut servir à l'élaboration d'un nouveau genre de TP permettant l'étude de transfert de matière au niveau de département de Génie-Chimique .

NOMENCLATURE

A :	Espèce chimique dans le mélange binaire AB	
A' :	Surface de contact gaz-liquide	(m <sup>2</sup> )
b :	Largeur de la plaque	(m)
C <sub>AO</sub> :	Concentration en soluté "A" dans le liquide à l'entrée dans la zone d'absorption	mole/m <sup>3</sup>
C <sub>Ai</sub> :	Concentration en soluté "A" à l'interface gaz-liquide	mole/m <sup>3</sup>
C <sub>Al</sub> :	Concentration en soluté "A" dans le liquide à la sortie de la zone d'absorption	mole/m <sup>3</sup>
C <sub>Ae</sub> :	Concentration en soluté "A" dans la phase liquide en équilibre avec la pression du gaz P <sub>Ae</sub>	mole/m <sup>3</sup>
( $\Delta C_A$ ) <sub>Ln</sub> :	Différence moyenne logarithmique de concentration en soluté "A"	mole/m <sup>3</sup>
D <sub>AB</sub> :	Coefficient de diffusion cinématique de la phase liquide	m <sup>2</sup> /s
g :	Accélération de la pesanteur	m <sup>2</sup> /s
H :	Constante d'Henry	mmHg
K <sub>G</sub> , k <sub>G</sub> :	Coefficient de transfert de matière global, partiel de la phase gazeuse	m/s
K <sub>L</sub> , k <sub>L</sub> :	Coefficient de transfert de matière global, partiel de la phase liquide	m/s
L :	Longueur de la plaque	m
L' :	Débit massique du liquide	kg/s
M <sub>A</sub> , M <sub>B</sub> :	Masse molaire du constituant "A" et "B"	g/mole
M' <sub>Mx</sub> :	Quantité de substance du constituant entrant par diffusion molaire selon la direction O <sub>x</sub>	mole
M' <sub>Tx</sub> :	Quantité de substance du constituant considéré entrant par diffusion turbulente	mole
N <sub>A</sub> :	vitesse nette de transfert du diffusant à travers l'unité de surface d'un plan perpendiculaire à la direction de diffusion	mole/m <sup>2</sup> s
P <sub>atm</sub> :	Pression atmosphérique	mmHg
P <sub>Ai</sub> :	Pression du gaz à l'interface gaz-liquide	mmHg
P <sub>Ae</sub> :	Pression du gaz à l'équilibre gaz-liquide	mmHg

- $P_A$  : Pr ession partielle du gaz mmHg  
 $P_I$  : Pr ession partielle des impuretés à l'interface mmHg  
 $Re'$  : Nombre de Reynolds  quivalent  
 $Sc$  : Nombre de Schmidt  
 $Sh^*$  : Nombre de Sherwood  quivalent  
 $T_{eG}, T_{sG}$  : Température entrée et sortie du gaz dans la zone d'absorption °C  
 $T_{eL}, T_{sL}$  : Température entrée et sortie du liquide dans la zone d'absorption °C  
 $\bar{T}_L$  : Température moyenne entre l'entrée et la sortie du liquide dans la zone d'absorption °C  
 $U_x, U_y, U_z$  : Vitesse massique du mélange fluide selon la direction  $Ox, Oy, Oz$  m/s  
 $U_s, U_{max}$  : Vitesse massique du liquide à la surface libre du film m/s  
 $V_{éch}$  : Volume de l'échantillon prélevé ml  
 $V_{2,NaOH}$  : Volume de la solution de soude ajouté à l'échantillon prélevé ml  
 $V_{1,HCL}, V_{2,HCL}, V_{3,HCL}$  : Volume de la solution de HCL nécessaire pour titrer ( premier , deuxième , troisième , ) l'échantillon formé de produit de l'absorption +  $V_{2,NaOH}$  ml  
 $\bar{V}_{1,HCL}$  : Volume moyen de la solution d'acide chloridrique nécessaire pour titrer volume del'échantillon formé produit de l'absorption prélevé +  $V_{2,NaOH}$  ajouté ml  
 $X_{A0} : X_{A1}$  : Rapport molaire  $CO_2, H_2O$  ; à l'entrée et la sortie de la zone d'absorption  $\frac{\text{kmole } CO_2}{\text{kmole } H_2O}$   
 $(\Delta X_A)_{ln}$  : Différence moyenne logarithmique des rapports moyens molaire  $CO_2, H_2O$

- $\alpha$  : Angle d'inclinaison
- $\beta_{exp}$  : Coefficient expérimental de transfert de matière du film liquide  $kg/m^2 s$
- $\beta_{th}$  : Coefficient théorique de transfert de matière du film liquide  $kg/m^2 s$
- $\Gamma$  : Débit massique du liquide par unité de largeur de la plaque  $kg/ms$
- $\delta_{AG}$  : Coefficient de diffusion dynamique du gaz dans le liquide  $kg/ms$
- $\bar{V}_2$  : Nombre à dimension linéaire  $m$
- $\rho_L$  : Masse volumique du liquide  $kg/m^3$
- $\mu_L$  : Viscosité dynamique du liquide  $Pa.s$
- $\epsilon_T$  : Coefficient de diffusion turbulente.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- ( 1 ) Christie , Geankopolis. , Mass Transport Phénoména ,  
Holt, Rinehart and Wonston, (1972)
- 2) Yaci W . , Projet de fin d'études , étudié par Bennadi. ,  
( Juin 1986 )
- (3) Drew T . , Advances in chemical engineering, Académique press In;  
( 1956 )
- (4) Astarita Giani , In , Chem, En 5 , 14 (1966)
- (5) Sherwood & Pigford . , Absorption and Etraction ,  
Mc Graw Hill (1952)
- (6) Hobler T. , Dytuzying Much masy i absorbey , WNT, Warszawa 1979
- (8) Perry J.H, Chem, En , Handbook ,  
Mc Graw Hill (1959)
- (8) Skeland, A.H.P., Diffusion mass transfer,  
Wiley Interscience Pulication (1974)
- ( 9 ) R. Treybal. , Mass-transfert Opérations ,  
Mc Graw Hill (1968)

Annexes (I; II; III)

Annexe I :ETALONAGE DU DEBITMETRE LIQUIDE

Nous avons constitué un circuit fermé indépendamment de notre installation, il comprend un bac , une pompe et le débitmètre liquide. Le procédé d'étalonnage que nous avons adopté est le suivant :

Nous fixons le flotteur sur une position donnée et nous mesurons le volume du liquide  $V$  obtenu pour un temps  $t$ . Le débit volumique est alors donné par :

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

Les résultats de cette étalonnage sont les suivant :

POSITION DU FLOTEUR	TEMPS EN SECONDES	VOLUME			DEBIT VOLUMIQUE $\dot{V} \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$
		$V \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
2	20	150	150	148	7,47
4	20	450	450	448	22,46
6	20	736	738	738	36,86
8	20	990	987	990	49,45
10	20	1250	1250	1250	62,50
12	20	1510	1508	1512	75,50
14	20	1745	1748	1745	87,30
15	20	1850	1850	1850	92,53

Ce tableau nous permettra de tracer la courbe d'étalonnage donné en page suivante.

DEBIT VOLUMIQUE

( $\dot{V} \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ )

ETALONNAGE DU DEBITMETRE  
LIQUIDE

100

80

60

40

20

2

4

6

8

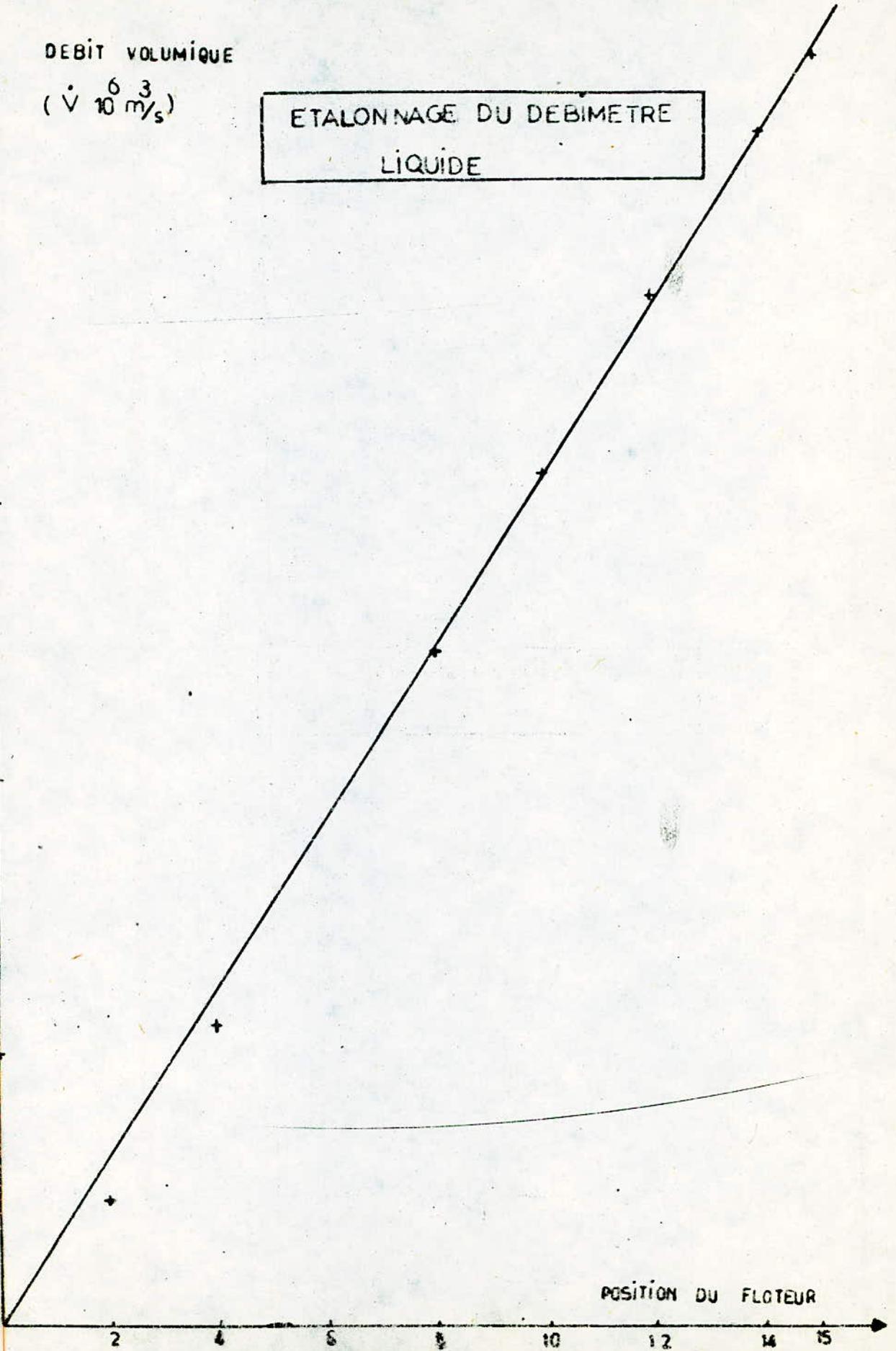
10

12

14

15

POSITION DU FLOTEUR



## Annexe II

### PROPRIETES PHYSIQUE DE L'EAU

D'APRES (T.HOBLER ., DYTUZYING MUCH MASY I ABSORPTION. )

Temp °C	0	5	10	15	20	25	30
Viscosite Dynamique (mPa·s)	1,7921	1,5188	1,3077	1,1404	1,0050	0,8937	0,8007
Massa Volumique kg/m <sup>3</sup>	999,87	999,99	999,73	999,13	998,23	997,08	995,68
Pression de vapeur saturante de l'eau (mmHg)	4,58	6,54	9,21	12,79	17,54	23,76	31,82
$N_2$ (m) · 10 <sup>6</sup>	68,83	6,10	55,77	5,10	46,76	43,42	40,41

( 2 )

### CONSTANTE D'HENRY DE (CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O)

Temp °C	0	5	10	15	20	25	30
C <sup>o</sup> HENRY H · 10 <sup>-6</sup> mmHg	0,55	0,64	0,73	0,82	0,92	1,01	1,11

( 3 )

$$D_{AB} (\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}) \text{ à } 20^\circ\text{C} = 1,763 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

```

10 N=100 G1=0 G2=0 G3=0 SP1=0 SP2=0 SP3=0 SQ1=0 SQ2=0
20 DIM BETA(100), G(100), SN(100), X1(100), Y1(100), X2(100)
30 FOR I=1 TO N
32 INPUT "BETA(I)="; BETA(I); INPUT "G(I)="; G(I); INPUT "SN(I)="; SN(I)
50 X1(I)=LOG(BETA(I)); X2(I)=LOG(G(I)); X3(I)=LOG(SN(I))
60 Y1(I)=X1(I)*X1(I); Y2(I)=X1(I)*X2(I); Y3(I)=X2(I)*X2(I)
70 PRINT "I="; I; "Y1(I)="; Y1(I); "Y2(I)="; Y2(I); "Y3(I)="; Y3(I)
80 S1=Y1(I)+S1; S2=X1(I)+G2-S3-X2(I)+S3
90 P1=X2(I)*Y1(I); P2=X1(I)*Y1(I); P3=X1(I)*X2(I)
100 S1=SP1+P1; SP2=SP2+P2; SP3=SP3+P3
110 Q1=X1(I)*Y2(I); Q2=X2(I)*Y2(I)
120 SQ1=SQ1+Q1; SQ2=SQ2+Q2
130 NEXT I
140 PRINT "S1="; S1; "S2="; S2; "S3="; S3
150 PRINT "SP1="; SP1; "SP2="; SP2; "SP3="; SP3
160 PRINT "SQ1="; SQ1; "SQ2="; SQ2

```

CE PROGRAMME PERMET DE CALCULER TOUTES LES SOMMES  
 ET LA SOMME DES PRODUITS DE NOTRE SYST- SYSTEME DE

= 1 Y(1)=-1.766033 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-3.057600  
= 2 Y(1)=-1.667129 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-3.057600  
= 3 Y(1)=-1.790092 X1(1)=-.8702727 X2(1)=-3.057600  
= 4 Y(1)=-1.681923 X1(1)=-.8702727 X2(1)=-3.057600  
= 5 Y(1)=-1.044717 X1(1)=-1.111304 X2(1)=-3.057600  
= 6 Y(1)=-1.745031 X1(1)=-1.111304 X2(1)=-3.057600  
= 7 Y(1)=-1.989747 X1(1)=-1.402424 X2(1)=-3.057600  
= 8 Y(1)=-2.005299 X1(1)=-1.402424 X2(1)=-3.057600  
= 9 Y(1)=-2.136054 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-3.057600  
= 10 Y(1)=-2.121097 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-3.057600  
= 11 Y(1)=-2.189524 X1(1)=-1.814619 X2(1)=-3.057600  
= 12 Y(1)=-2.141497 X1(1)=-1.814619 X2(1)=-3.057600  
= 13 Y(1)=-2.267500 X1(1)=-2.042531 X2(1)=-3.057600  
= 14 Y(1)=-2.221466 X1(1)=-2.562639 X2(1)=-3.057600  
= 14 Y(1)=-2.221466 X1(1)=-2.042531 X2(1)=-3.057600  
= 15 Y(1)=-1.723703 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-2.198225  
= 15 Y(1)=-1.574092 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-2.198225  
= 17 Y(1)=-1.530374 X1(1)=-.0625129 X2(1)=-2.198225  
= 18 Y(1)=-1.676061 X1(1)=-.0625129 X2(1)=-2.198225  
= 18 Y(1)=-1.013331 X1(1)=-1.062473 X2(1)=-2.198225  
= 20 Y(1)=-2.02155 X1(1)=-1.062473 X2(1)=-2.198225  
= 21 Y(1)=-1.961908 X1(1)=-1.375552 X2(1)=-2.198225  
= 22 Y(1)=-1.797939 X1(1)=-1.375552 X2(1)=-2.198225  
= 23 Y(1)=-2.049184 X1(1)=-1.579379 X2(1)=-2.198225  
= 24 Y(1)=-2.146009 X1(1)=-1.579379 X2(1)=-2.198225  
= 25 Y(1)=-2.186581 X1(1)=-1.794564 X2(1)=-2.198225  
= 25 Y(1)=-2.002703 X1(1)=-1.794564 X2(1)=-2.198225  
= 27 Y(1)=-2.150293 X1(1)=-2.000095 X2(1)=-2.198225  
= 28 Y(1)=-2.079042 X1(1)=-2.000095 X2(1)=-2.198225  
= 29 Y(1)=-1.609138 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-1.980502  
= 30 Y(1)=-1.442907 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-1.980502  
= 31 Y(1)=-1.439991 X1(1)=-.8702727 X2(1)=-1.980502  
= 32 Y(1)=-1.450736 X1(1)=-.8702727 X2(1)=-1.980502  
= 33 Y(1)=-1.501436 X1(1)=-1.015203 X2(1)=-1.980502  
= 34 Y(1)=-1.47402 X1(1)=-1.015203 X2(1)=-1.980502  
= 35 Y(1)=-1.839921 X1(1)=-1.563509 X2(1)=-1.980502  
= 36 Y(1)=-1.657106 X1(1)=-1.563509 X2(1)=-1.980502  
= 37 Y(1)=-2.002703 X1(1)=-1.794564 X2(1)=-1.980502  
= 38 Y(1)=-1.92985 X1(1)=-1.794564 X2(1)=-1.980502  
= 39 Y(1)=-2.12377 X1(1)=-2.095571 X2(1)=-1.980502  
= 40 Y(1)=-2.093459 X1(1)=-2.095571 X2(1)=-1.980502  
= 41 Y(1)=-1.507875 X1(1)=-.722908 X2(1)=-1.703791  
= 42 Y(1)=-1.523123 X1(1)=-.722908 X2(1)=-1.703791  
= 43 Y(1)=-1.6143 X1(1)=-1.001755 X2(1)=-1.703791  
= 44 Y(1)=-.7295754 X1(1)=-1.001755 X2(1)=-1.703791  
= 44 Y(1)=-1.57301 X1(1)=-1.001755 X2(1)=-1.703791  
= 45 Y(1)=-1.766518 X1(1)=-3.052741 X2(1)=-3.520361  
= 45 Y(1)=-1.766518 X1(1)=-1.350155 X2(1)=-1.703791  
= 46 Y(1)=-1.001946 X1(1)=-1.350155 X2(1)=-1.703791  
= 47 Y(1)=-1.927054 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-1.703791  
= 48 Y(1)=-2.022659 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-1.703791

1- 50 Y(1)=-2.375009 X1(1)=-1.795165 X2(1)=-1.783791  
 1- 51 Y(1)=-2.265 X1(1)=-2.096384 X2(1)=-1.783791  
 1- 52 Y(1)=-2.272444 X1(1)=-2.096384 X2(1)=-1.783791  
 1- 53 Y(1)=-1.765858 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-1.783791  
 1- 54 Y(1)=-1.479199 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-1.496129  
 1- 55 Y(1)=-1.33393 X1(1)=-.7940731 X2(1)=-1.496129  
 1- 56 Y(1)=-1.379088 X1(1)=-.7940731 X2(1)=-1.410587  
 1- 57 Y(1)=-1.406334 X1(1)=-.9110544 X2(1)=-1.410587  
 1- 58 Y(1)=-1.757822 X1(1)=-1.337504 X2(1)=-1.410587  
 1- 59 Y(1)=-1.783732 X1(1)=-1.337504 X2(1)=-1.410587  
 1- 60 Y(1)=-1.921959 X1(1)=-3.801979 X2(1)= 3.135494  
 1- 60 Y(1)=-1.921959 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-1.410587  
 1- 61 Y(1)=-1.888755 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-1.410587  
 1- 62 Y(1)=-2.173752 X1(1)=-2.095571 X2(1)=-1.410587  
 1- 63 Y(1)=-1.980647 X1(1)=-2.095571 X2(1)=-1.410587  
 1- 64 Y(1)=-1.463737 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-1.262308  
 1- 65 Y(1)=-1.401043 X1(1)=-.6959511 X2(1)=-1.262308  
 1- 66 Y(1)=-1.462053 X1(1)=-.8625129 X2(1)=-1.262308  
 1- 67 Y(1)=-1.417249 X1(1)=-.8625129 X2(1)=-1.262308  
 1- 68 Y(1)=-1.518176 X1(1)=-1.062184 X2(1)=-1.262308  
 1- 69 Y(1)=-1.542153 X1(1)= 3.542987 X2(1)= 3.806662  
 1- 69 Y(1)=-1.542153 X1(1)=-1.062184 X2(1)=-1.262308  
 1- 70 Y(1)=-1.783077 X1(1)=-1.375552 X2(1)=-1.262308  
 1- 71 Y(1)=-1.733472 X1(1)=-1.375552 X2(1)=-1.262308  
 1- 72 Y(1)=-1.865234 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-1.262308  
 1- 73 Y(1)=-1.835506 X1(1)=-1.579394 X2(1)=-1.262308  
 1- 74 Y(1)=-2.000409 X1(1)=-1.784564 X2(1)=-1.262308  
 1- 75 Y(1)=-1.925657 X1(1)=-1.784564 X2(1)=-1.262308  
 1- 76 Y(1)=-1.291639 X1(1)=-.6371451 X2(1)=-1.035638  
 1- 77 Y(1)=-1.194914 X1(1)=-.6371451 X2(1)=-1.035638  
 1- 78 Y(1)=-1.479725 X1(1)=-.9920925 X2(1)=-1.035638  
 1- 79 Y(1)=-1.222409 X1(1)=-.9920925 X2(1)=-1.035638  
 1- 80 Y(1)=-1.461018 X1(1)=-1.217396 X2(1)=-1.035638  
 1- 81 Y(1)=-1.395577 X1(1)=-1.217396 X2(1)=-1.035638  
 1- 82 Y(1)=-1.534562 X1(1)=-1.398697 X2(1)=-1.035638  
 1- 83 Y(1)=-1.498470 X1(1)=-1.398697 X2(1)=-1.035638  
 1- 84 Y(1)=-1.541723 X1(1)=-1.563032 X2(1)=-1.035638  
 1- 85 Y(1)=-1.788705 X1(1)=-1.563032 X2(1)=-1.035638  
 1- 86 Y(1)=-1.780049 X1(1)=-1.787967 X2(1)=-1.035638  
 1- 87 Y(1)=-1.806792 X1(1)=-1.787967 X2(1)=-1.035638  
 1- 88 Y(1)=-1.376542 X1(1)=-.7900908 X2(1)=-.8915981  
 1- 89 Y(1)=-1.222409 X1(1)=-.9920925 X2(1)=-1.035638  
 1- 90 Y(1)=-1.565512 X1(1)=-.7900908 X2(1)=-.8915981  
 1- 91 Y(1)=-1.430074 X1(1)=-.9920925 X2(1)=-.8915981  
 1- 92 Y(1)=-1.380617 X1(1)=-.9920925 X2(1)=-.8915981  
 1- 93 Y(1)=-1.496159 X1(1)=-1.131052 X2(1)=-.8915981  
 1- 94 Y(1)=-1.789543 X1(1)=-1.131052 X2(1)=-.8915981  
 1- 95 Y(1)=-1.587075 X1(1)=-1.362369 X2(1)=-.8915981  
 1- 96 Y(1)=-5.156581 X1(1)= 8.008426 X2(1)= 3.526501  
 1- 96 Y(1)=-1.751174 X1(1)=-1.362369 X2(1)=-.8915981  
 1- 97 Y(1)=-1.906094 X1(1)=-1.611041 X2(1)=-.8915981  
 1- 98 Y(1)=-2.039221 X1(1)=-1.611041 X2(1)=-.8915981  
 1- 99 Y(1)=-2.079762 X1(1)=-1.794564 X2(1)=-.8915981  
 1- 100 Y(1)=-1.975442 X1(1)=-1.794564 X2(1)=-.8915981

51= 177.4402 52= 177.0985 53= 184.9707  
 54= 330.304 55= 374.8084 56= 330.304  
 57= 379.1328 58= 411.8914

Results

