

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

1ex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE

المندوبية الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

ETUDE HYDRODYNAMIQUE  
ET DETERMINATION DES AIRES  
INTERFATIALES DANS UNE  
COLONNE A GARNISSAGE

Proposé par :  
Melle Wahiba YAICI

Etudié par :  
Malika AIT-MOUHOUB

Dirigé par :  
Melle Wahiba YAICI

PROMOTION : Janvier 1987



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

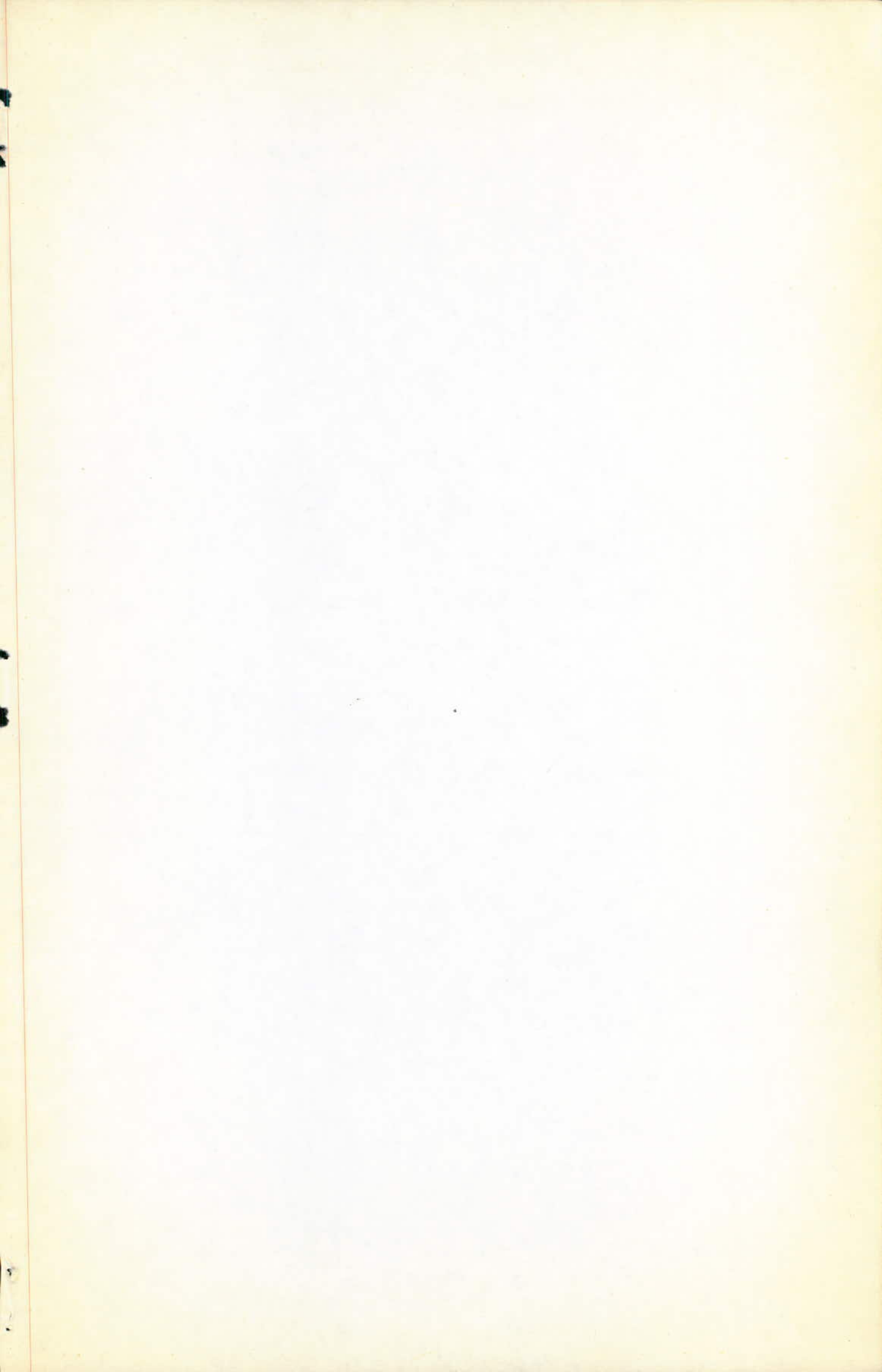
ETUDE HYDRODYNAMIQUE  
ET DETERMINATION DES AIRES  
INTERFACIALES DANS UNE  
COLONNE A GARNISSAGE

Proposé par :  
Melle Wahiba YAICI

Etudié par :  
Malika AIT-MOUHOUB

Dirigé par :  
Melle Wahiba YAICI

PROMOTION : Janvier 1987





الموضوع : دراسة هيدروديناميكية وتحسين المساحات البينية لعمود مجهز  
ملاخض : عمدا هذا يتلخص في الدراسة الهيدروديناميكية والتبادل  
المادي داخل عمود مجهز الذي يحمل في تيار متعاكس لغاز  
وسائل . في الجزء الأول من العمل تم تعيين الخواص الهيدروديناميكية  
سالتفاضية ، الفيناع في الفضة الغازي بوجود و بغياب مرور السائل .  
في الجزء الثاني من العمل تم تعيين الطريقة الكيميائية التي تسمح بالإمتعاق  
المتبوع بالتفاع الكيميائية المعروفة السرعة والذي درست خواصه  
الفزيوكيميائية .  
لمعرفة تأثير هندسة التجهيز لحملات راشيق ذات 10,5 و 7,5 مم  
في أدني قطر اسمعدهنا .

Sujet : ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET DETERMINATION DES AIRES INTERFACIALES  
DANS UNE COLONNE A GARNISSAGE

Résumé : Le présent travail a porté sur l'étude hydrodynamique et le  
transfert de matière dans une colonne à garnissage fonctionnant à  
contre courant de gaz et de liquide. La première partie a consisté  
en la détermination des propriétés hydrodynamiques telles que la  
porosité , la perte de charge en présence et en absence d'écoulement  
liquide, les rétentions de liquide et les débits maximaux à l'engor-  
gement . La seconde partie a porté principalement sur la méthode  
chimique mettant en oeuvre une absorption suivie d'une réaction  
chimique de cinétique connue et dont les propriétés physico-chimiques  
sont étudiées. Pour voir l'effet de la dimension du garnissage, des  
anneaux Rasching de 10,5 et de 7,4mm de diamètre nominal ont été  
utilisés.

Subject: THE HYDRODYNAMIC STUDY AND DETERMINATION OF THE INTERFACIAL  
IN PACKED COLUMN.

ABSTRACT : This work has two parts. The first one consists in the  
hydrodynamic study (porosity, pressure drop, hold-up) , and the mass  
trasfert in a packed column . The second one, consists in fiding out  
the chemical method involving the absorption phenomina followed  
by a chemical reaction whose kinetic is well-known but nis physico-  
chemical properties are studied.



A la mémoire de mon père ,  
A ma mère ,  
en témoignage de reconnaissance .

A ma famille ,  
A ceux qui me sont chers .

°° AVANT PROPOS °°

Le présent travail a été effectué à l'Ecole Nationale Polytechnique ,sous la direction bienveillante de Melle YAICI ,maitre assistante à l'ENP .

Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour la confiance qu'elle m'a accordée et pour la riche documentation qu'elle a mise à ma disposition.

Je voudrais la remercier également pour ses précieux conseils qui m'ont permis d'acquérir une intéressante formation à la recherche grace à l'esprit critique et au dynamisme scientifique dont elle m'a fait preuve .

Je remercie Mr BOURKIZA pour l'honneur qu'il me fait en presidant ce jury.

Ma gratitude va aussi à Mr CIESLAK pour la sollicitude avec laquelle il a suivi certaines parties de ce travail et d'avoir accepté de participer à mon jury.

Je suis touchée par la presence de Mr DOUCHANOV , Et Mr TYCZKOWSKI et je les remercie pour l'interet qu'ils temoignent ainsi à mon travail.

Qu'il me soit permis de remercier S.A KECILI pour son aide et et son devouement constant ainsi que pour sa bonne humeur qui a été d'un précieux secours dans les moments difficiles .

Enfin que toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail et en particulier MRS M.K BOUAMOUD et M BENIDDIR, trouvent ici l'expression de ma sincere reconnaissance.

\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$  
\$\$\$\$\$\$\$\$  
\$\$  
\$



INTRODUCTION :

- 1 - Partie Théorique :
  - 1.1 - Etude hydrodynamique d'une colonne à garnissage
    - 1.1.1 - Description du poste d'étude
    - 1.1.2 - Ecoulements des fluides
      - 1.1.2.1 - Ecoulement forcé du gaz dans un garnissage sec
        - Relation d'Ergun
        - Relation de Brauer
      - 1.1.2.2 - Ecoulements gaz-liquide à contre courant en colonne arrosée
        - Perte de charge
        - Engorgement
    - 1.1.3 - La rétention
      - 1.1.3.1 - Définitions
        - Le taux de rétention capillaire
        - Le taux de rétention non capillaire
        - Le taux de rétention total
      - 1.1.3.2 - Détermination du taux de rétention
        - Le taux de rétention capillaire
        - Le taux de rétention non capillaire
      - 1.1.3.3 - Détermination du taux de rétention total par la méthode de distribution des temps de séjour ( D.T.S)
        - Détermination de la D.T.S au moyen de traceur
        - Réponse à une injection impulsion
        - Accès à la rétention
  - 1.2 - Absorption gaz - liquide avec ou sans réaction chimique
    - 1.2.1 - Absorption physique
      - 1.2.1.1 - Introduction
      - 1.2.1.2 - Coefficients de transfert de matière
      - 1.2.1.3 - Modèles d'absorption en milieu turbulent
        - \* Modèle du film de Whitman
        - \* Modèles à renouvellement de surfaces
    - 1.2.2 - Absorption avec réaction chimique
      - 1.2.2.1 - Introduction
      - 1.2.2.2 - Réaction chimique inversible du premier ordre
      - 1.2.2.3 - Réaction chimique inversible du deuxième ordre
      - 1.2.2.4 - Réaction chimique inversible de m, n<sup>ième</sup> ordre
      - 1.2.2.5 - Réaction rapide de pseudo premier ordre
      - 1.2.2.6 - Signification physique du critère de A<sub>atta</sub>
      - 1.2.2.7 - Signification du facteur d'accélération E

1.2.3 - Application de la théorie du transfert de matière avec réaction chimique par la détermination des aires interfaciales.

1.2.3.1 - Introduction

1.2.3.2 - Méthodes physique par la détermination de a

1.2.3.3 - Méthodes chimique par la détermination de a

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## 2. Partie expérimentale :

2.1 - Etude hydrodynamique

2.1.1 - Caractéristique du garnissage et des fluides

2.1.2 -1 - Pertes de charge

- Mode opératoire
- Résultats
- Exploitation des résultats

2.1.2.2 - Comparaison avec les résultats de la littérature

- Application de la relation de Brauer
- Application de la relation d'Ergun

2.1.3 - Ecoulement gaz-liquide à contre courant en colonne arrosée

2.1.3.1 - Pertes de charge

- Mode opératoire
- Résultats
- Exploitation des résultats

- a - Influence du débit de gaz
- b - Influence du débit de liquide
- c - Influence de la nature du liquide
- d - Influence de la taille au garnissage

2.1.3.2 - Engorgement

- Application de la corrélation de Lenz et Lavin
- Application de la corrélation de Takahashi
- Application du diagramme de Lobo

2.1.4 - La rétention

2.1.4.1 - Détermination de la rétention capillaire

- Mode Opératoire
- Résultats
- Exploitation des résultats



2.1.4.2 - Détermination de la rétention non capillaire

- Mode opératoire

- Résultats

- Exploitation des résultats

a - Influence des débits gazeux et liquides

b - Influence de la nature du liquide

c - Influence de la forme et de la taille du garnissage.

2.1.4.2.1 - Comparaison avec les résultats de la littérature

- Application de l'équation d'Otake et Okada (1,12)

- Application de la relation de Tichy (1,15)

2.1.4.3 - Détermination de la rétention totale

2.1.4.3.1 - Utilisation de la rétention capillaire et non capillaire

2.1.4.3.2 - Comparaison avec les résultats de la littérature

2.1.4.3.3 - Utilisation de la D.T.S

- Mode opératoire

- Résultats

Exploitation des résultats

2.2 - Détermination de l'aire interfaciale

2.2.1 - Principe de détermination

2.2.2 - Choix des conditions opératoires

- Estimation de la résistance en phase gazeuse

- Vérification des conditions de régime réactionnel rapide de pseudo premier ordre

2.2.3 - Mode opératoire

2.2.4 - Résultats

2.2.5 - Discussion des résultats

2.2.6 - Comparaison avec les résultats de la littérature

- Application de la formule d'onda et Coll 1.27

- Application de la formule de Zech et Mersmann 26,28

CONCLUSION

L'absorption gaz liquide est une opération unitaire très utilisée dans l'industrie chimique.

Ce procédé caractérise en effet le transfert de matière, à travers l'interface, d'une phase gazeuse vers une phase liquide, ou inversement dans le cas d'une désorption.

En général, un ou plusieurs solutés gazeux diffusent dans le ou les diluants de la phase gazeuse, traversent l'interface, se dissolvent dans le liquide (absorption physique) et réagissent éventuellement avec un ou plusieurs réactifs présents dans la phase liquide (absorption avec réaction chimique).

Ce type de transfert est mis en oeuvre industriellement dans des appareils appelés absorbeurs et réacteurs gaz liquide.

Le Calcul technique prévisionnel, le dimensionnement, la simulation et l'extrapolation de ces contacteurs nécessitent la connaissance des paramètres suivants :

- Le type de contacteur
- Les débits respectifs des phases liquide et gazeuse
- Les limites de fonctionnement hydrodynamique
- La quantité de liquide contenu par unité de volume de réacteur
- Les grandeurs physico-chimiques du système étudié (diffusivité et solubilité)
- La constante cinétique réactionnelle
- L'air interfaciale de transfert
- Les conductances partielles ou globales de transfert de matière
- Les phénomènes de dispersion.

Le principe des méthodes chimiques est de mettre en oeuvre une absorption suivie d'une réaction dont on connaît parfaitement la cinétique pour différents régimes chimiques suivant que la réaction est instantanée ou d'un pseudo ordre, ou lente, on détermine respectivement  $k_G a$  ou  $k_L a$  et  $a$  ou  $k_L a$ .

.../...



Il a été proposé d'étudier une colonne à garnissage à contre-courant de gaz et de liquide à l'état arrosé.

Deux types de garnissage, le premier constitué par des anneaux Raschig de 10,5 mm de diamètre nominal et le deuxième constitué par des anneaux Raschig de 7,4 mm de diamètre nominal, ont été choisis afin de compléter l'étude entreprise antérieurement [26] en déterminant les taux de rétention dans le garnissage d'anneaux Raschig de 10,5 mm de diamètre nominal par différentes méthodes et de voir ensuite l'influence de la diminution de la taille du garnissage sur la rétention, la perte de charge et l'aire interfaciale de contact gaz-liquide.

Le travail que nous présentons comporte deux chapitres.

Le premier chapitre est un rappel de l'hydrodynamique d'une colonne à garnissage fonctionnant à contre courant de gaz et de liquide, et du transfert de matière sans et avec réaction chimique, nécessaire à notre étude.

Le deuxième chapitre montre les montages expérimentaux qui ont servi à réaliser la présente étude et regroupe les résultats de l'hydrodynamique et de la détermination des aires interfaciales, leur interprétation et leur comparaison avec les travaux de la littérature.

## I.I - Etude hydrodynamique d'une colonne à garnissage

L'étude du transfert de matière entre un gaz et un liquide qui s'écoulent simultanément à travers le garnissage d'une colonne d'absorption nécessite la connaissance préalable du fonctionnement hydrodynamique de la colonne.

Ce fonctionnement est difficile à caractériser car il dépend à la fois des propriétés des fluides (débits, masses volumiques, viscosité, tension superficielle) et de celles du garnissage ( texture, géométrique dimension, mouillabilité).

En général, la détermination de grandeurs macroscopiques résultant de mesures globales est suffisante pour prévoir avec une approximation correcte les conditions de fonctionnement industriel.

### I.I.I. - Description du poste d'étude

Le poste d'étude de la colonne à garnissage, qui a été conçu permet la mesure de :

- La perte de charge subie par le courant gazeux circulant seul ou à contre courant de liquide.
- La rétention de liquide dans la colonne
- Le coefficient de transfert dans la phase liquide ou le coefficient de transfert dans la phase gazeuse ou l'aire interfaciale du garnissage suivant le système gaz liquide mis en oeuvre lors de l'étude de transfert de matière.

Cette installation comprend principalement une colonne cylindrique garnie d'anneaux Raschig.

Ce garnissage agit d'une triple manière :

- 1) Il augmente l'aire de contact gaz-liquide et donc la surface d'échange par unité de volume
- 2) Il provoque des micro tourbillons locaux dans le film liquide renouvelle sa surface et favorise ainsi le brassage et l'homogénéisation locale de sa concentration en soluté.



3) Il empêche la formation de grands mouvements de convection et de turbulence dans la phase gazeuse. Il maintient ainsi une forte différence de concentration de l'entrée à la sortie de la colonne.

L'alimentation en air est assurée par un compresseur.

L'alimentation en liquide placé dans un bac de stockage s'effectue par l'intermédiaire d'une pompe centrifuge.

La mesure des débits s'effectue pour l'air à l'aide d'un rotamètre étalonné dans les conditions normales de température et de pression, et pour le liquide à l'aide d'un débitmètre préalablement étalonné.

La perte de charge du gaz traversant le garnissage est mesurée par l'indication d'un manomètre différentiel dont les branches sont reliées à deux prises de pression situées de part et d'autre de la section garnie fig - (6).

I.1.2- Ecoulements des fluides

I.1.2.I- Ecoulement forcé du gaz dans un garnissage sec :

L'écoulement forcé d'un gaz à travers le garnissage sec est caractérisé par la perte de charge subie par le gaz en fonction de son débit. De nombreuses relations ont été proposées dans la littérature pour prévoir cette perte de charge.

\* Relation d'Ergun : [I - 3]

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_K \gamma_G a_p^2 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} U_G + h_B \int_G a_p \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} U_G^2 \quad (1)$$

avec  $h_K$  = constante de Cozeny

$h_B$  = Constante de Burke Plummer

Les valeurs numériques de ces coefficients ont été déduites d'expériences effectuées sur des lits garnis de particules convexes (Sphères et Cylindres pleins). Ergun a trouvé :

$$h_K = 4,5 \pm 0,5$$

$$h_B = 0,3$$

.../...

Mais ces valeurs ne conviennent pas pour des particules possédant un trou comme les anneaux Raschig

En reportant graphiquement le rapport  $\frac{\Delta P}{Z} \frac{I}{U_G}$  en fonction du débit massique spécifique G de gaz, les points expérimentaux se placent sur une droite dont la pente et l'ordonnée à l'origine donnent respectivement  $h_B$  et  $h_K$ .

\* Relation de Brauer [1, 2, 4]

Pour tenir compte de l'influence du trou Brauer a proposé de remplacer  $a_p$  par un produit de deux facteurs :

$a_e$  = aire spécifique externe de chaque anneau supposé plein  
 $F^n$  = fonction de la porosité interne  $\epsilon_i$  de chaque anneau n étant un coefficient numérique dépendant de la forme du garnissage.

$$a_p = a_e \cdot F^n = a_e \left[ \frac{1 + \frac{2}{3} \sqrt{\epsilon_i} - \frac{1}{3} \epsilon_i}{1 - \epsilon_i} \right]^n \quad (2)$$

La perte de charge d'exprime alors par la relation de Brauer sous la forme

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_k a_e^2 F^{2n} \left( \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i^3} \right)^2 U_G + h_B a_e F^n \int_G \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i^3} U_G^2 \quad (3)$$

La valeur empirique moyenne de l'exposant proposée par Brauer dans le cas des anneaux Raschig est  $n = 1,9$

plus récemment Laurent et Coll ont proposé une relation générale entre n,  $\epsilon_i$ , D et  $\epsilon$  pour :

$$5 < d < 35 \text{ mm}$$

$$11,6 < D/d < 44 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{n} \frac{D}{d_i} = \left( \frac{\epsilon D^2}{d_i^2} \right)^{0,75} + \left( 0,01 \frac{\epsilon D^2}{d_i^2} \right)^{0,75} \quad (4)$$

I.I.2.2 - Ecoulement gaz liquide à contre courant en colonne arrosée

\* Perte de charge :

Aux faibles débits gazeux la variation de la perte de charge pour un débit de liquide non nul a la même allure que celle pour un garnissage sec. Ceci est dû au fait qu'il n'existe pas d'interactions importantes entre le gaz et le liquide.

La relation généralement proposée pour la perte de charge du gaz est de la forme [2]



$$\Delta P = \alpha \cdot 10^{\beta L} \frac{G^2}{f_g} \quad (5)$$

$\Delta P$  = perte de charge en mm Hg par m de hauteur garnie

| Type                   | Dimension<br>(in) (mm) |    | Epaisseur<br>(mm) | Fraction de<br>vide (%) | $\alpha$ | $\beta$ |
|------------------------|------------------------|----|-------------------|-------------------------|----------|---------|
| a.R<br>en<br>Céramique | 3                      | 76 | 9,5               | 75                      | 0,74     | 0,031   |
|                        | 2                      | 51 | 6,5               | 75                      | 1        | 0,03    |
|                        | 1                      | 25 | 3                 | 73                      | 2,2      | 0,045   |
|                        | 1/2                    | 13 | 2,5               | 64                      | 10       | 0,1     |
| a.R<br>en<br>acier     | 2                      | 51 | 1,2               | 94                      | 0,95     | 0,03    |
|                        | 1-1/2                  | 38 | 0,9               | 94                      | 1,2      | 0,04    |
|                        | 1                      | 25 | 0,7               | 93                      | 1,7      | 0,043   |

a.R : Anneau Raschig

- A partir d'un certain débit de gaz, le taux de rétention augmente sous l'influence du frottement du gaz et la perte de charge croît approximativement comme  $G^3$  et  $G^4$ . C'est le "point de charge".

Il se produit des rides sur la surface du garnissage et une accumulation de liquide dans les espaces morts.

Lorsqu'on accroît d'avantage le débit gazeux, on se situe dans la zone de charge.

- Quand  $\frac{\Delta P}{Z} = f(G)$  tend vers une verticale " l'engorgement" du garnissage apparaît le taux de rétention est alors suffisant pour empêcher tout écoulement de gaz.

Dans un article récent de synthèse Reichelt a proposé une forme reliant pour un même débit de gaz donné, la perte de charge en garnissage arrosé à la perte de charge en garnissage sec [1, 5] .

$$\frac{\left(\frac{\Delta P}{Z}\right)_{L,G}}{\left(\frac{\Delta P}{Z}\right)_{L=0,G}} = \alpha_1 + \alpha_2 \left( \frac{\Delta P}{Z} \frac{1}{f_{\text{eau}} \cdot g} \right)_{L=0,G}^{\alpha_3} \quad (6)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 2 \cdot 10^{10} B^{4,7} + 3,9 \cdot 10^4 B^{1,73} + 3,0 B^{0,1} \\ \alpha_2 &= 2 \cdot 10^{22} B^{7,3} + 1,34 \cdot 10^8 B^{2,14} + 2,6 \cdot 10^2 B^{0,55} \\ \alpha_3 &= 14 B^{0,36} \end{aligned}$$

$$B = \left( \frac{\eta_L}{\rho \cdot g^2} \right)^{1/3} \frac{L}{d_{hw}} \cdot \left( \frac{\rho_G \cdot \rho_L}{\rho \cdot \eta_L} \right)^{0,1}$$

$$d_{hw} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} dp \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{1}{1 - \varepsilon} \frac{dp}{D}}$$

$$d_p = \frac{6(1 - \varepsilon)}{a_s} \quad a_s = c \frac{1}{d}$$

Reichert : indique que pour les a.R c'est de l'ordre de 5 à 5,5,  $a_s$  ainsi calculée a le même ordre de grandeur que  $a_c$

Le domaine d'application est défini dans les conditions suivantes

$$\begin{aligned} 0,0855 < \rho_G < 1,88 \text{ Kg.m}^{-3} \\ 800 < \rho_L < 1600 \text{ Kg.m}^{-3} \\ 10 \cdot 10^{-6} < Q_G < 26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ 0,675 \cdot 10^{-6} < Q_L < 500 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ 0,36 < \varepsilon < 0,97 \\ 1,61 < \frac{D}{d} < 17,4 \end{aligned}$$

\* Engorgement :

L'engorgement d'une colonne de diamètre donné, est une condition limite de fonctionnement qu'il est important de connaître, car elle fixe le débit maximal de gaz pour un débit de liquide donné.

Il se définit de deux façons

- Visuellement, par examen du garnissage en fonctionnement au sommet duquel se forme une couche de liquide écumense.
- Graphiquement, comme étant le point à partir duquel en coordonnées logarithmiques, les gaz et pour un débit de liquide donné deviennent presque verticales.

De nombreux auteurs ont tenté de relier le point d'engorgement à la nature du garnissage et aux paramètres caractéristiques des fluides. Parmi les courbes empiriques présentées, les plus connues sont celles de Sherwood, Labo et Zens [1, 6 - 8]

Ces auteurs relient graphiquement deux paramètres adimensionnels.

$$\frac{G_E^2}{\rho_G \cdot \rho_L \cdot g} \frac{a_p (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left( \frac{\eta_L}{\eta_{eau}} \right)^{0,2} \text{ versus } \frac{L}{G} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (7)$$



Zenz et Lavin [I - 9] ont proposé l'équation suivante de leur courbe : (8)

$$14,22 \left[ \frac{G_E}{\sqrt{\rho_L \cdot \rho_G}} \sqrt{\frac{a_p (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left( \frac{\eta_L}{\eta_{eau}} \right)^{0,2}} \right]^{1/3} + 10,43 \left[ \frac{L}{\rho_L} \sqrt{\frac{a_p (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \left( \frac{\eta_L}{\eta_{eau}} \right)^{0,2}} \right]^{1/2} = 18,91$$

Plus récemment Takahashi et coll [I - 10] ont étendu cette forme de corrélation du débit d'engorgement à d'autres colonnes gaz-liquide et liquide - liquide. Ces auteurs proposent l'équation suivante :

$$\frac{G_E}{\sqrt{\rho_G \cdot \rho_L}} \sqrt{\frac{a_p (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\eta_L^{0,2}}{g}} = \exp \left[ \frac{2,9}{\ln \left( \frac{L}{\rho_L} \sqrt{\frac{a_p (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\eta_L^{0,2}}{g}} \right)} \right] \quad (9)$$

### I.1.3- La rétention

#### I.1.3.1 - Définitions :

Lorsqu'un liquide s'écoule par gravité à travers le garnissage la grandeur habituellement mesurée est la rétention

Si V est le volume total de la colonne garnie,  $\varepsilon$  la porosité c'est-à-dire la fraction de ce volume qui est vide,  $\beta$  le taux de rétention c'est à dire la fraction de vide qui est occupée par le liquide, la rétention de liquide est définie par le volume  $V \cdot \varepsilon \cdot \beta$ .

On distingue trois sortes de taux de rétention :

#### \* Le taux de rétention Capillaire ( $\beta_c$ )

Localisé aux points de contact entre les éléments de garnissage et dans les pores sans communication vers le bas.

Pour un liquide et un garnissage donnés, cette grandeur est indépendante du débit d'arrosage.

Cette rétention dépend de la nature du matériau, de la dimension des particules, de leur état de surface et de la nature du liquide.

#### \* Le taux de rétention non capillaire ( $\beta_{nc}$ )

Constitué au contraire du liquide en mouvement dans le garnissage. La valeur dépend à la fois des débits liquides et gazeux et de leur sens respectif d'écoulement.

\* Le taux de rétention total ( $\beta_t$ )

C'est la somme du taux de rétention capillaire et non capillaire.

I.I.3.2- Détermination du taux de rétention

Le taux de rétention capillaire ( $\beta_c$ )

Charpentier [II] a proposé une représentation graphique de cette grandeur en fonction du nombre d'EÖTVOS ( $EÖ = (\rho_L \cdot g \cdot d^2) / \sigma_L$ ) dont la fig ( I ) est une illustration

\* Le taux de rétention non capillaire ( $\beta_{nc}$ )

La plupart des relations proposées peuvent se mettre sous la forme générale :

$$\beta_{nc} = B \cdot Re^{a'} \cdot G_a^b \cdot F(S) \quad (10)$$

dans laquelle

$$Re = \frac{L}{N^{1/3} \cdot \eta_L}$$

$$G_a = \frac{\rho_L^2 \cdot g}{N \cdot \eta_L^2}$$

F(S) = fonction speciale de correction

N = nombre de particules de garnissage par unité de volume

$$N = \frac{1 - \epsilon}{V_g}$$

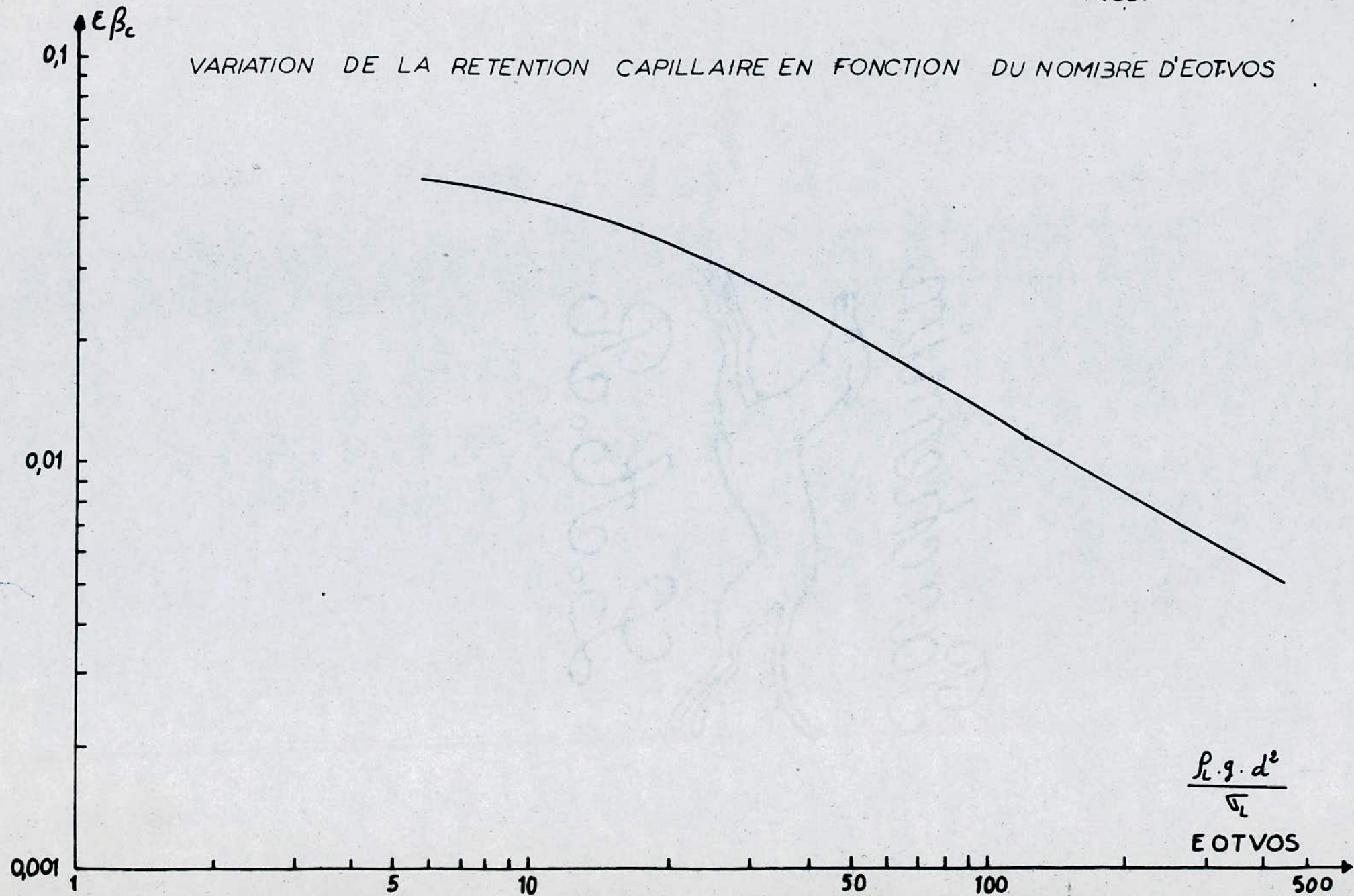
Les trois relations suivantes sont semi empiriques et proviennent à la fois de l'expérience et de l'analyse dimensionnelle.

|                                  | B     | a     | b      | F ( S )  |
|----------------------------------|-------|-------|--------|--|
| Otake et Okada<br>[12] $Re > 10$ | 1,295 | 0,676 | - 0,44 | $ag \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{d}{(Nd^3)^{0,215}}$ (11) |
| Varnier et Rao<br>[13]           | 7,12  | 0,67  | - 0,44 | $\frac{1}{\epsilon}$ (12)                                      |
| Mohunta et Ladha<br>[14]         | 16,13 | 0,75  | - 0,5  | $\frac{1}{\epsilon} \cdot (N \cdot \frac{d^3}{g})^{-0,5}$ (13) |

.../...



FIG. 1



-10-

Parmi ces relations, et bien que  $R_e$  ne soit pas toujours supérieur à 10, c'est celle d'Otaka et Okada qui, dans l'ensemble donne le meilleur accord avec nos résultats à  $\pm 25\%$  près.

A débit de gaz nul les auteurs sont en général d'accord pour relier le taux de rétention  $\beta$  au débit liquide L par la relation :

$$\beta = A.L^a \quad (I4)$$

dans laquelle :

- A est une fonction du diamètre équivalent du garnissage et des propriétés physiques du liquide.

- a est une fonction du type et de l'état de surface du garnissage  
Il est maintenant possible de prévoir l'évolution de la rétention non capillaire en fonction du débit de gaz pour un débit liquide donné.

Tichy [I, I5] a proposé la relation :

$$\frac{G}{G_E} = \frac{\beta_G^3 - \beta_e^3}{\beta_{GE}^3 - \beta_e^3} \left[ \frac{(1 - \beta_e) \beta_{GE}}{(1 - \beta_{GE}) \beta_G} \right] \quad (I5)$$

L'utilisation pratique de cette corrélation nécessite donc la connaissance du débit de gaz à l'engorgement  $G_E$  et de la valeur de la rétention non capillaire à débit de gaz nul  $\beta_0$  dont  $\beta$  et  $\beta_e$  sont des fonctions.

Les fonctions reliant  $\beta_0$ ,  $\beta$  et  $\beta_e$  sont proposées par Lolar [I, I6] sous la forme :

$$\beta_e = 1,044\beta_0 - 0,009 \quad (I6)$$

$$\beta_{GE} = (\beta_e)^{0,75} \quad (I7)$$

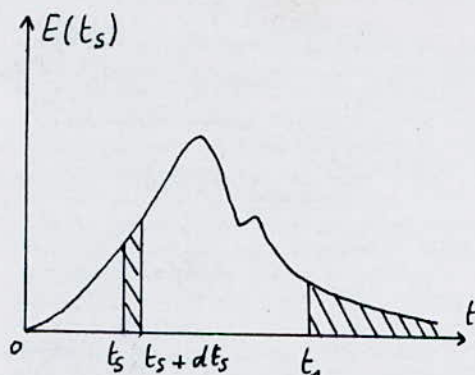
I.I.3.3- Détermination du taux de rétention total par la méthode de distribution des temps de séjour (D.T.S)

\* Les principales fonctions de distribution

La fonction la plus importante est la distribution des temps de séjour  $E(t_s)$  (en abrégé D.T.S.) telle que  $E(t_s)$  d  $t_s$  est la fraction du débit de sortie contenant des molécules d'âge compris entre  $t_s$  et  $t_s + dt_s$

.../...





On voit d'après cette définition que

$$E(t_s) = \frac{\iint_S u f dS}{\iint_S u dS} \quad (18)$$

Où  $U$  est la vitesse de fluide en différents points de la surface  $S$  et  $f$  une fraction de volume.

Les conditions de normation impliquent que :

$$\int_0^{\infty} E(t_s) dt_s = 1 \quad (19)$$

$E(t_s)$  peut aussi être assimilée à la densité de probabilité du temps de séjour  $t_s$  dans le débit de sortie.

\* Détermination expérimentale de la D.T.S. au moyen de traceur

La méthode des traceurs consiste à "marquer" les molécules entrant dans le réacteur, et à suivre leur histoire jusqu'à la sortie. Le traceur peut être une substance radioactive, un colorant ou toute substance de mêmes propriétés hydrodynamiques que le fluide, mais décelable par une propriété physique caractéristique telle que la conductibilité électrique, thermique, etc ...

On applique à l'aide du traceur un certain "signal" à l'entrée du réacteur et on examine sa "réponse" à la sortie.

\* Réponse à une injection impulsion

L'expérience consiste à injecter un traceur ( $n$  moles) pendant un temps très court devant le temps de passage  $\tau$  ( $\ll \tau$ ).

.../...

Soit  $c(t)$  la concentration du traceur à la sortie.

A l'instant  $t$ , la quantité du traceur qui est sortie du réacteur depuis le début de l'expérience est celle qui a un temps de séjour inférieur à  $t$  :

$$\int_0^t Qc dt = n \int_0^t E(t_s) dt_s$$

On en déduit :

$$E(t) = \left( \frac{1}{\tau} \right) \cdot c(t) \quad (21)$$

La D.T.S apparaît ainsi comme la réponse à une injection impulsion de type Dirac [17]

\* Accès à la rétention

La D.T.S permet d'accéder à la rétention. La relation entre la rétention du liquide  $B$  le temps de séjour  $\bar{t}$  et la porosité  $\epsilon$  est donnée par l'équation :

$$B = \frac{L \cdot \bar{t}}{L - \epsilon \cdot Z} \quad (23)$$

Pour déterminer ces temps, on utilise des traceurs dont la concentration est aisément mesurable et dont la présence ne change pas les propriétés du système (en particulier la compressibilité)

On utilise souvent du sel dont on détermine la concentration par conductimétrie.



I.2- Absorption gaz liquide avec ou sans réaction chimique

I.2.I- Absorption physique

I.2.I.I- Introduction

Considérons un contact diphasique gaz-liquide. Supposons que les molécules d'un constituant A du gaz traversant l'interface gaz-liquide.

Il y a un transport des molécules de A d'une phase à l'autre et au sein du liquide, dû microscopiquement aux mouvements thermiques moléculaires.

Macroscopiquement et dans le cas d'une opération isotherme, ce fait conduit à un transport net de A d'une phase à l'autre, et au sein du liquide, d'une région de concentration importante en A vers une région de faible concentration.

Si la pression partielle de A à l'interface est égale à  $P_{Ai}$ , sa concentration à l'interface est égale à  $C_{Ai}$ , ces deux grandeurs sont liées par la loi de Henry :

$$P_{Ai} = H_e \cdot C_{Ai} \quad (24)$$

Où  $H_e$  est un coefficient constant dans le cas des solutions diluées ne dépendant que de la température.

I.2.I.2- Coefficients de transfert de matière :

Le flux spécifique du constituant A à travers l'interface gaz-liquide peut être décrit par les relations suivantes :

$$\varphi = k_G \cdot (P_{A\infty} - P_{Ai}) \quad (25)$$

$$\varphi = k_L \cdot (C_{Ai} - C_{A\infty}) \quad (26)$$

Si nous supposons que :

- Les résistances au transfert de matière sont localisées dans les deux couches limites de part et d'autre de l'interface.

.../...

- La résistance de l'interface est négligeable.
- Il n'y a pas d'accumulation de matière à l'interface
- Le gaz de pression  $P_{Ai}$  se trouve en équilibre thermodynamique avec la solution de concentration  $C_{Ai}$ .

Les relations ( 25 ) et ( 26 ) mènent à :

$$\varphi = k_G ( P_{A_\infty} - P_{Ai} ) = k_L ( C_{Ai} - C_{A_\infty} ) \quad ( 27 )$$

Il n'est pas facile d'appliquer cette équation, parce que les valeurs de  $P_{Ai}$  et  $C_{Ai}$  ne sont pas connues d'où l'utilisation de l'équation.

$$\varphi = K_G ( P_{A_\infty} - P_{Ae} ) = K_L ( C_{Ae} - C_{A_\infty} ) \quad ( 28 )$$

Les grandeurs des équations ( 27 ) et ( 28 ) sont portées sur la fig ( 2 )

- Le point E représente un gaz de pression partielle  $P_{A_\infty}$ , qui est transféré dans un liquide de concentration  $C_{A_\infty}$ .
- Le point F représente les conditions d'équilibre à l'interface gaz-liquide
- Le point G représente un gaz de pression partielle  $P_{Ae}$  en équilibre avec une solution de concentration  $C_{A_\infty}$ .
- Le point H représente une solution de concentration  $C_{Ae}$  en équilibre avec un gaz de pression partielle  $P_{A_\infty}$ .

Si la solubilité du gaz dans la solution obéit à la loi de Henry, nous obtenons :

$$\varphi = k_G \cdot ( P_{A_\infty} - P_{Ai} ) = k_L \cdot ( C_{Ai} - C_{A_\infty} )$$

$$\varphi = K_G \cdot ( P_{A_\infty} - P_{Ae} ) = K_L \cdot ( C_{Ae} - C_{A_\infty} )$$

$$P_{A_\infty} = H_e \cdot C_{Ae} \quad ( 29 )$$

$$P_{Ae} = H_e \cdot C_{A_\infty} \quad ( 30 )$$

$$P_{Ai} = H_e \cdot C_{Ai} \quad ( 24 )$$

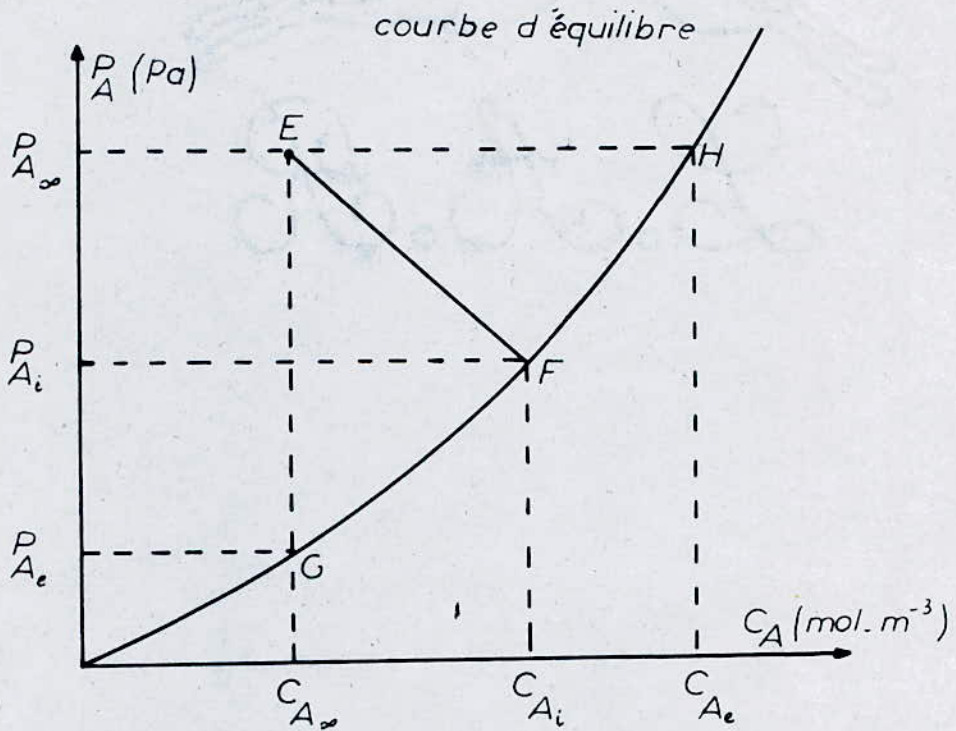
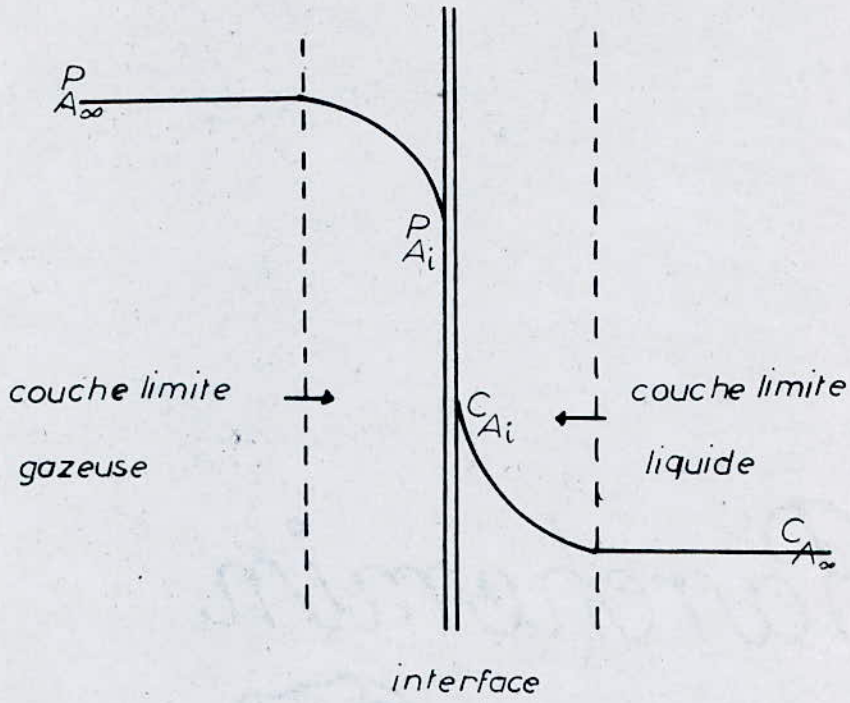
$$\text{d'où } \frac{1}{k_G} = \frac{P_{A_\infty} - P_{Ae}}{\varphi} = \frac{( P_{A_\infty} - P_{Ai} ) - ( P_{Ae} - P_{Ai} )}{\varphi}$$

$$\frac{1}{k_G} = \frac{P_{A_\infty} - P_{Ai}}{\varphi} - \frac{H_e ( C_{A_\infty} - C_{Ai} )}{\varphi}$$

.../...

×





TRANSFERT DE MATIERE ENTRE DEUX PHASES  
GAZ-LIQUIDE.

FIG-2

$$\begin{aligned}
 &= \frac{I}{k_G} + \frac{H_e}{k_L} \\
 \frac{I}{k_L} &= \frac{C_{Ae} - C_{A\infty}}{\varphi} = \frac{(C_{Ai} - C_{A\infty}) - (C_{Ai} - C_{Ae})}{\varphi} \\
 &= \frac{C_{Ai} - C_{A\infty}}{\varphi} + \frac{(P_{A\infty} - P_{Ai})}{H_e \cdot \varphi} \\
 &= \frac{I}{k_L} + \frac{I}{k_G \cdot H_e}
 \end{aligned}$$

En récapitulant :

$$\frac{I}{k_G} = \frac{I}{k_G} + \frac{H_e}{k_L} \quad (31)$$

$$\frac{I}{k_L} = \frac{I}{k_L} + \frac{I}{H_e \cdot k_G} \quad (32)$$

### I.2.I.3 - Modèles d'absorption en milieu turbulent

\* Modèle du film de Whitman [18 - 19]

Dans la représentation de ce modèle, On suppose qu'il existe à la surface du liquide au contact du gaz un film stagnant d'épaisseur  $\delta_L$  alors que la composition du restant de liquide est maintenue constante par agitation turbulente.

Le gaz dissout est transporté exclusivement par diffusion moléculaire

La concentration en gaz dissout dans le film décroît de  $C_{Ai}$  à l'interface jusqu'à  $C_{Ao}$  au bord intérieur du film, c'est à dire au sein du liquide.

On a :

$$\varphi = \frac{D_{AL}}{\delta_L} (C_{Ai} - C_{A\infty}) = k_L (C_{Ai} - C_{A\infty}) \quad (33)$$

d'où :

$$k_L = \frac{D_{AL}}{\delta_L} \quad (34)$$

.../...



\* Modeles à renouvellement de surface

On suppose que les éléments de liquide situés à l'interface sont remplacés périodiquement par des éléments venus de l'intérieur du liquide. Tant que l'élément est à l'interface, donc au contact du gaz, il absorbe comme une couche de liquide stagnante d'épaisseur infinie. Le transfert de matière est alors caractérisé :

- Soit par un temps de séjour  $\tau$   $\longrightarrow$  Modèle de Higbie [20 - 21]

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \varphi \cdot dt = 2 \sqrt{\frac{D_{AL}}{\pi \cdot \tau}} (C_{Ai} - C_{A\infty}) = k_L (C_{Ai} - C_{A\infty}) \quad (35)$$

d'où

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D_{AL}}{\pi \cdot \tau}} \quad (36)$$

- Soit par une vitesse de renouvellement S des éléments de liquide à l'interface  $\longrightarrow$  Modèle de Danck Werts [20, 22]

$$\bar{\varphi} = \sqrt{D_{AL} \cdot S} (C_{Ai} - C_{A\infty}) = k_L (C_{Ai} - C_{A\infty}) \quad (37)$$

d'où

$$k_L = \sqrt{D_{AL} \cdot S} \quad (38)$$

\* Choix du modèle :

Actuellement nous ne connaissons pas les valeurs de la diffusivité avec une précision capable de nous indiquer quel modèle décrit mieux la réalité. Donc nous nous contentons de considérer les modèles interchangeables et le choix du modèle dépendant de la commodité de son emploi.

I.2.2 - Absorption avec réaction chimique :

I.2.2.1 - Introduction

Considérons un système gaz-liquide. Supposons que le gaz A en se propageant dans la phase liquide réagit avec le constituant B de la phase liquide selon la réaction.

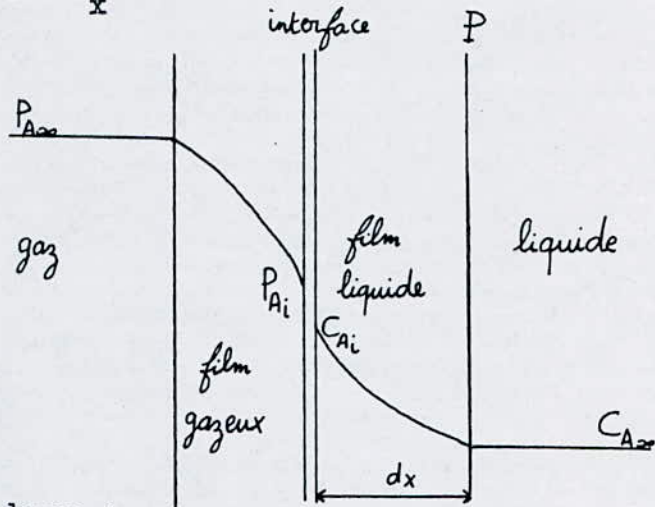


.../...

dont la cinétique est :  $r = k_{mm} C_A^m \cdot C_B^n$  ( 39 )

où  $k_{mm}$  est la constante cinétique.

Considérons un plan parallèle à l'interface gaz-liquide à une distance différentielle  $d_x$



Le bilan de matière donne :

( quantité traversant l'interface ) - ( quantité traversant le plan P à la position  $d_x$  ) - ( quantité réagissant avec le réactif ) = ( accumulation dans l'élément du liquide )

c'est - à - dire :

$$(- D_{AL} \frac{\partial C_A}{\partial x}) - (- D_{AL} \frac{\partial}{\partial x} [C_A + \frac{\partial C_A}{\partial x} d_x]) - r d_x = \frac{\partial C_A}{\partial t} d_x$$

$$\implies D_{AL} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - r = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad ( 40 )$$

La présence de la réaction chimique modifie le profil de concentration de A dans le liquide et aussi l'expression du flux d'absorption qui est souvent représenté par l'équation :

$$\Psi = E \cdot k_L (C_{Ai} - C_{A\infty}) = k_G (P_{A\infty} - P_{Ai}) \quad ( 41 )$$

où E est un facteur dit " facteur d'accélération " dû à la présence de la réaction chimique.

Les solutions analytiques et numériques des équations de la diffusion différent selon le type de réaction.

I.2.2.2- Réaction chimique irréversible du premier ordre

L'équation de diffusion s'écrit :

$$D_{AL} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - k_I \cdot C_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (42)$$



Dans le cadre de la théorie du double film et pour le régime stationnaire nous obtenons :

$$D_{AL} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - k_I \cdot C_A = 0 \quad (43)$$

Les conditions limitées sont :

Pour  $x = 0$        $C_A = C_{Ai}$

Pour  $x = \delta_L$        $C_A = C_{A\infty}$

Les flux spécifique d'absorption de A est donné par

$$\varphi = \frac{k_L \cdot H_a}{t \cdot \sinh \frac{H_a}{a}} \cdot \left( C_{Ai} - \frac{C_{A\infty}}{\cosh \frac{H_a}{a}} \right) \quad (44)$$

ou

$$H_a = \sqrt{\frac{D_{AL} \cdot K_I}{k_L}} \quad (45) ; \quad E = \frac{H_a}{t \cdot \sinh \frac{H_a}{a}} \quad (46)$$

I.2.2.3- Réaction chimique irréversible du deuxième ordre

L'équation de diffusion s'écrit :

$$D_{AL} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - k_2 \cdot C_A \cdot C_B = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (47)$$

Dans le cadre de la théorie du double film et pour le régime stationnaire nous obtenons :

$$D_{AL} \frac{d^2 C_A}{dx^2} - k_2 \cdot C_A \cdot C_B = 0 \quad (48)$$

$$D_{BL} \frac{d^2 C_B}{dx^2} - z k_2 C_A C_B = 0 \quad (49)$$

Les conditions aux limites étant :

Pour  $x = 0$        $C_A = C_{Ai}$       et       $\frac{d C_B}{dx} = 0$

Pour  $x = \delta_L$        $C_A = C_{A\infty}$       et       $C_B = C_{B\infty}$

.../...

La résolution des équations ( 48 ) et ( 49 ) n'est pas possible analytiquement. Van Krevelen et Hoftijzer [18, 23] proposent une résolution approximative dans le cas où  $C_{A\infty}$  est nul

$$E = \frac{H_a \sqrt{\frac{E_1 - E}{E_1 - I}}}{t \operatorname{anh} \left[ H_a \sqrt{\frac{E_1 - E}{E_1 - I}} \right]} \quad ( 50 )$$

avec

$$Ha = \frac{\sqrt{D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_{B\infty}}}{k_L} \quad ( 51 )$$

et

$E_1$  un facteur dit " facteur d'accélération instantané " Hatta [18] en faisant l'hypothèse d'un film liquide stagnant propose.

$$E_1 = I + \frac{D_{BL} \cdot C_{B\infty}}{z D_{AL} \cdot C_{Ai}} \quad ( 52 )$$

La théorie de pénétration de Higbie fournit

$$E_1 = \left( I + \frac{D_{BL} \cdot C_{B\infty}}{z D_{AL} \cdot C_{Ai}} \right) \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} \quad ( 53 )$$

La résolution qu'ils proposent étant implicite, Van Krevelen et Hoftijzer proposent aussi une représentation graphique sous forme des valeurs de facteur  $E$  en fonction de  $H_a$ , le facteur  $E_1$  étant considéré comme paramètre ( fig 4 )

Sur cette figure, nous distinguons trois régions :

Région A, correspondant à  $H_a \ll I$  et  $E - I$ , c'est à dire que la réaction est trop lente pour influencer l'absorption physique d'où

$$\varphi = k_L C_{Ai} \quad \text{et} \quad C_{A\infty} = 0 \quad ( 54 )$$

\* Région B, Correspondant à  $Ha > 3$  et  $E \approx Ha$ , avec  $Ha \ll E_1$

Il s'agit du cas des réactions rapides.

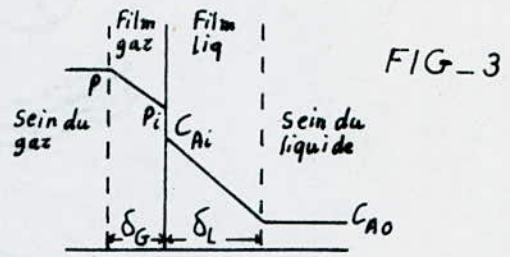
$$\text{d'où} \quad \varphi = D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_B \cdot C_{Ai} \quad ( 55 )$$

Région C, Correspondant à  $H_a \gg E_1$  et  $E = E_1$

Il s'agit du cas des réactions instantanées

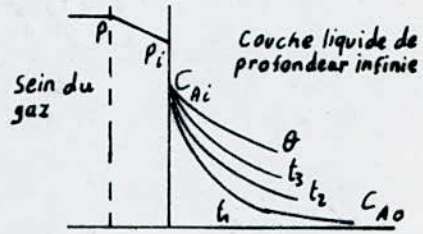
$$\text{d'où} \quad \varphi = \left( I + \frac{D_{BL} \cdot C_{B\infty}}{3 \cdot D_{AL} \cdot C_{Ai}} \right) \cdot k_L \cdot C_{Ai} \quad ( 56 )$$





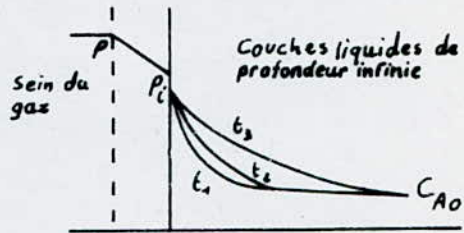
$$k_L = \frac{D_A}{\delta_L}$$

Modele du Film de Whitman



$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D_A}{\pi t}}$$

Modele de Higbie



$$k_L = \sqrt{D_A S}$$

Modele de Danckwerts

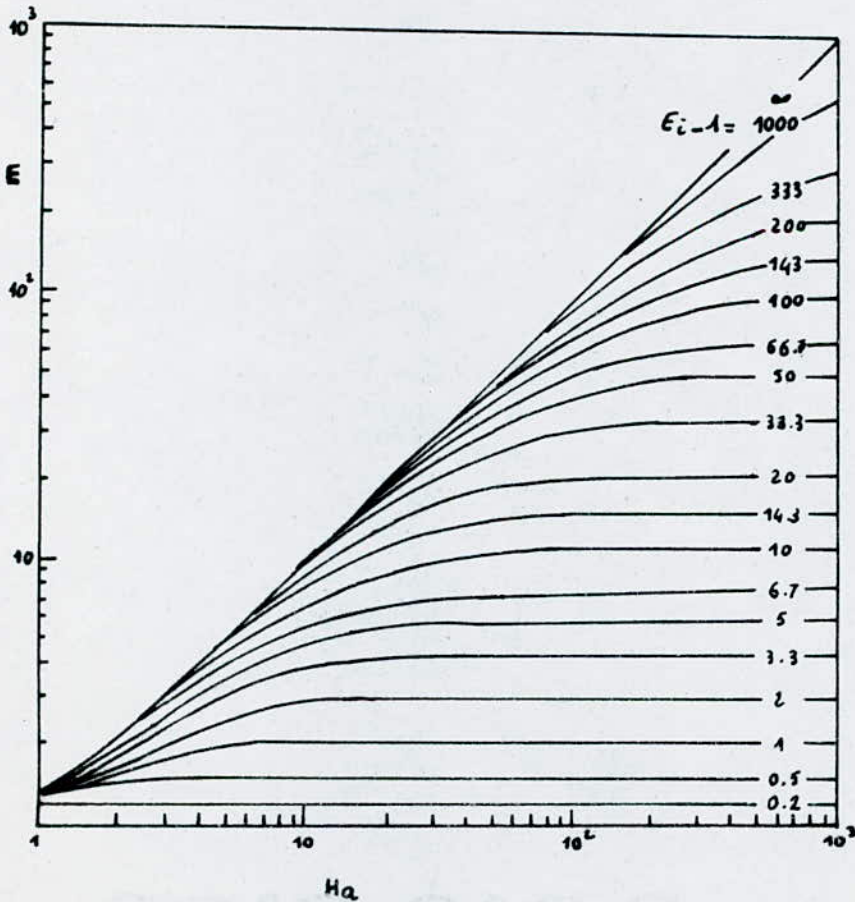


FIG-4

I.2.2.4- Réaction chimique irréversible de m, n - ième ordre

Considerons une réaction d'ordre m par rapport à A et n par rapport à B (  $r = k_{mn} \cdot C_A^m \cdot C_B^n$  ). Hikita et Asai [24 - 25] ont montré que dans ce cas le régime de réaction dépend toujours du Ha défini par:

$$H_a = \frac{I}{k_L} \sqrt{\frac{2}{m+1} k_{mn} \cdot D_{AL} \cdot C_{Ai}^{m-1} \cdot C_{B\infty}^n} \quad ( 57 )$$

$E_i$  se calcule par ( 52 ) ou ( 53 ) suivant le modèle utilisé.

Ainsi lorsqu'on connaît Ha et  $E_i$ , il est possible de déterminer E.

I.2.2.5- Réaction rapide de pseudo premier ordre :

Si la concentration en reactif B au sein du liquide est beaucoup plus grande que  $C_{Ai}$ , la cinétique de la réaction devient une cinétique du pseudo premier ordre (  $k_I = k_2 C_{Bo}$  )

Comme dans ce régime  $E = H_a$ , on a :

$$\psi = \sqrt{k_2 \cdot C_{Bo} \cdot D_{AL} \cdot C_{Ai}} \quad ( 58 )$$

I.2.2.6- Signification physique du critère de Hatta.

Plaçons nous dans le cadre du modèle du film en l'absence de résistance en phase gazeuse. Si on veut déterminer, si on se trouve en présence d'une réaction lente, rapide ou intermédiaire, il est intéressant de considérer une portion d'aire interfaciale égale à l'unité de surface et de définir un paramètre de conversion dans le film :

$$M = \frac{\text{Conversion maximale possible dans le film}}{\text{quantité maximale traversant le film par diffusion}}$$

$$= \frac{k_2 \cdot C_{B\infty} \cdot \delta_L^2}{D_{AL}} = \frac{k_2 \cdot C_{B\infty} \cdot D_{AL}}{k_L^2} = Ha^2 \quad ( 59 )$$

Lorsque  $Ha^2 \gg 1$ , la réaction a lieu entièrement dans le film et c'est l'aire interfaciale qui est déterminante.

.../...



Au contraire, si  $Ha^2 \ll I$  le taux de conversion dans le film est négligeable, c'est alors le volume de liquide qui est déterminant.

$Ha$  est donc le critère pour déterminer si la réaction a lieu :

- entièrement au sein du liquide ( $Ha < 0,3$ ), ce qui nécessite un grand volume de liquide.
- Entièrement dans la couche limite diffusionnelle ( $Ha > 3$ ), ce qui conduit à des appareils à grande aire interfaciale.
- En partie dans le film et au sein du liquide, auquel cas il faut des appareils à grande aire interfaciale et à grande rétention de liquide.

#### I.2.2.7 - Signification du facteur d'accélération E

E représente le rapport du flux moyen d'absorption dans un liquide agité en présence de réaction au flux d'absorption purement physique s'il n'y a pas de gaz dissous au sein du liquide.

#### I.2.3- Application de la théorie du transfert de matière avec

##### Réaction chimique pour la détermination des aires interfaciales

#### I.2.3.1 - Introduction

Soit un écoulement diphasique à travers un réacteur gaz liquide. L'étude du réacteur du point de vue transfert de matière consiste en la mesure de l'aire interfaciale  $a$  créée dans le réacteur ainsi que les produits  $k_G a$  et  $k_L a$ .

Il existe plusieurs méthodes de mesure des trois grandeurs proprement dites.

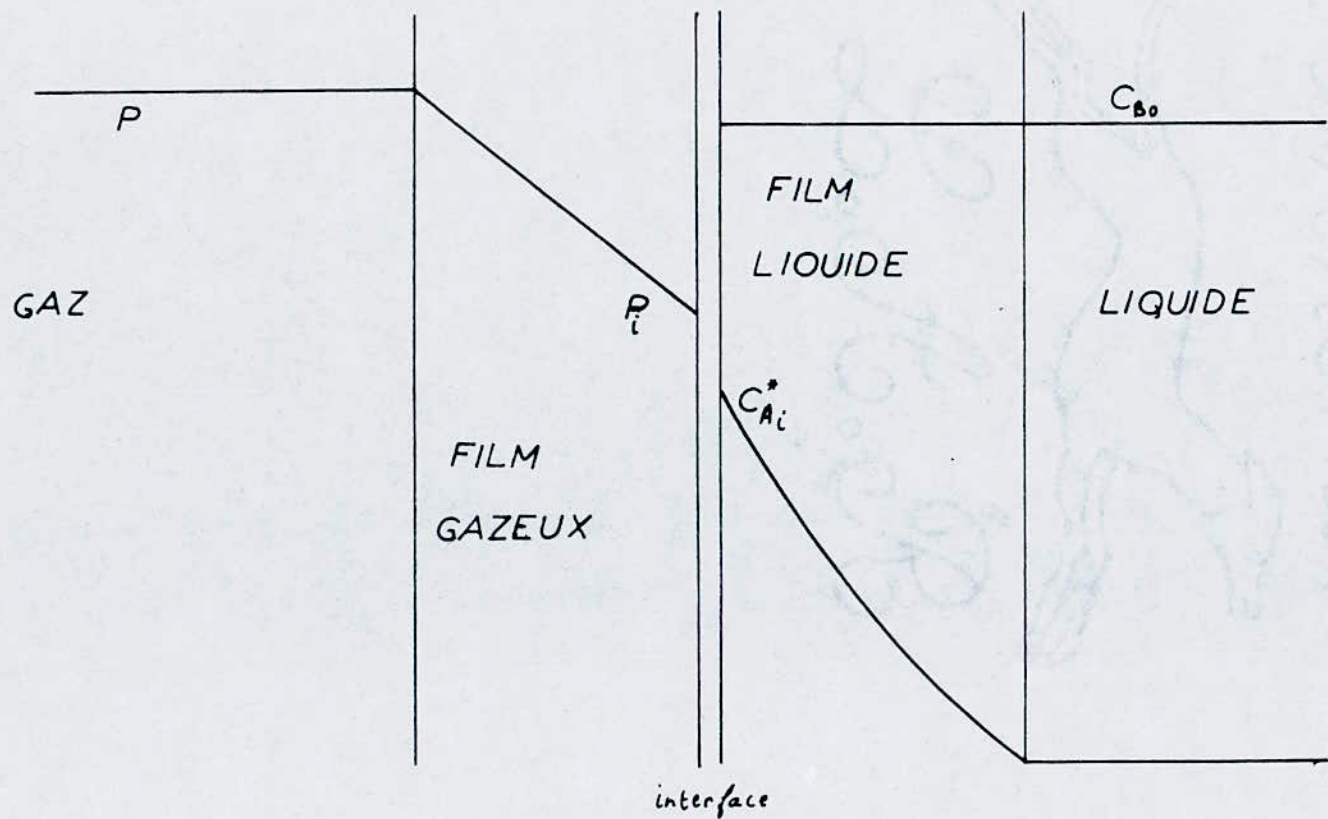
#### I.2.3.2- Méthodes physiques pour la détermination de $a$ :

Ce sont des techniques photographiques, de mesure d'atténuation ou de réflexion de lumière ou d'autres rayons et des techniques à sondes résistives.

Leur inconvénient est le fait que très souvent  $a$  varie beaucoup d'un point du réacteur à l'autre.

FIG\_5

PROFIL DE CONCENTRATION POUR UNE REACTION RAPIDE DE PSEUDO 1<sup>er</sup> ou m<sup>ème</sup> ORDRE





I.2.3.3 - Méthodes chimiques pour la détermination de a

Pour déterminer l'aire interfaciale on emploie une réaction rapide de pseudo premier ou pseudo m<sup>e</sup> ordre.

Le flux d'absorption s'exprime par :

$$\bar{I} = E \cdot k_L \cdot a \cdot C_{Ai} = H_a \cdot k_L \cdot a \cdot C_{Ai} = \sqrt{D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_{Bo}} \cdot a \cdot C_{Ai} \quad (60)$$

Il est indépendante de  $k_L$  et dans ce cas l'aire interfaciale a est obtenue par mesure expérimentale du flux d'absorption quand

On connaît la valeur de  $\sqrt{D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_{Bo}} \cdot C_{Ai}$  que l'on détermine le plus souvent avec le même système gaz-liquide dans un appareil de laboratoire à aire interfaciale comme 'jet laminaire, film tombant, sphère ...)

Le tableau suivant donne les divers systèmes chimiques utilisés pour mesurer a

| Soluté A        | Diluant            | Reactif B   | Catalyseur  |
|-----------------|--------------------|---|---|
| CO <sub>2</sub> | Air                | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + HN <sub>3</sub> CO <sub>3</sub><br>K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + HKCO <sub>3</sub> | A <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> O <sup>-</sup><br>ClO <sup>-</sup> |
| CO <sub>2</sub> | Air                | l <sub>1</sub> OH - Na OH<br>KOH - B <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>   |   |
| CO <sub>2</sub> | Air                | Na <sub>2</sub> S   |   |
| O <sub>2</sub>  | Air                | Solutions CuCl  |   |
| O <sub>2</sub>  | Air N <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   |   |
| O <sub>2</sub>  | Air N <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>   | CO SO <sub>4</sub><br>ClI SO <sub>4</sub>                           |

***PARTIE EXPERIMENTALE***



## 2- PARTIE EXPERIMENTALE//

### 2.I - Etude hydrodynamique

#### 2.I.I - Caractéristiques du garnissage et des fluides

Nous avons utilisé pour garnissage des anneaux Raschig de 10,5 mm de diamètre nominal puis des anneaux Raschig de 7,4 mm de diamètre nominal.

La méthode de détermination des caractéristiques du garnissage est donnée en Annexe et les résultats sont regroupés dans le tableau ( I ).

Lors de l'étude hydrodynamique nous avons employé deux systèmes différents. Le premier est constitué par de l'hydroxyde de sodium (NaOH) dilué dans l'eau de ville et par de l'air surpressé. Le second système est constitué par un mélange de carbonate de Sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) et bicarbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) dilué dans l'eau de ville, et comme gaz nous avons utilisé de l'air surpressé.

Nous avons étudié quatre débits spécifiques de liquide dans le domaine compris entre 2,61 et 6,69  $\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

Le débit d'air varie progressivement jusqu'à l'engorgement dans une gamme comprise entre 0,12 et 0,44  $\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

Les propriétés physico-chimiques de ces fluides sont présentées dans le tableau (2).

#### 2.I.2- Ecoulement forcé du gaz dans le garnissage sec

##### 2.I.2.I- Pertes de charge

Mode opératoire :

- Fixer le débit de liquide à  $L = 0$
- Faire varier progressivement le débit d'air
- Noter la perte de charge  $\Delta P$  entre les deux extrémités du garnissage au cours de l'écoulement de l'air avec la vitesse  $U_G$ .

.../...

\* Resultats :

Nos resultats experimentaux sont reportés dans le tableau ci-dessous :

T = 290 K

Garnissage : a . R . 7,4 mm

P = 762 mm Hg

Z = 0,65 m

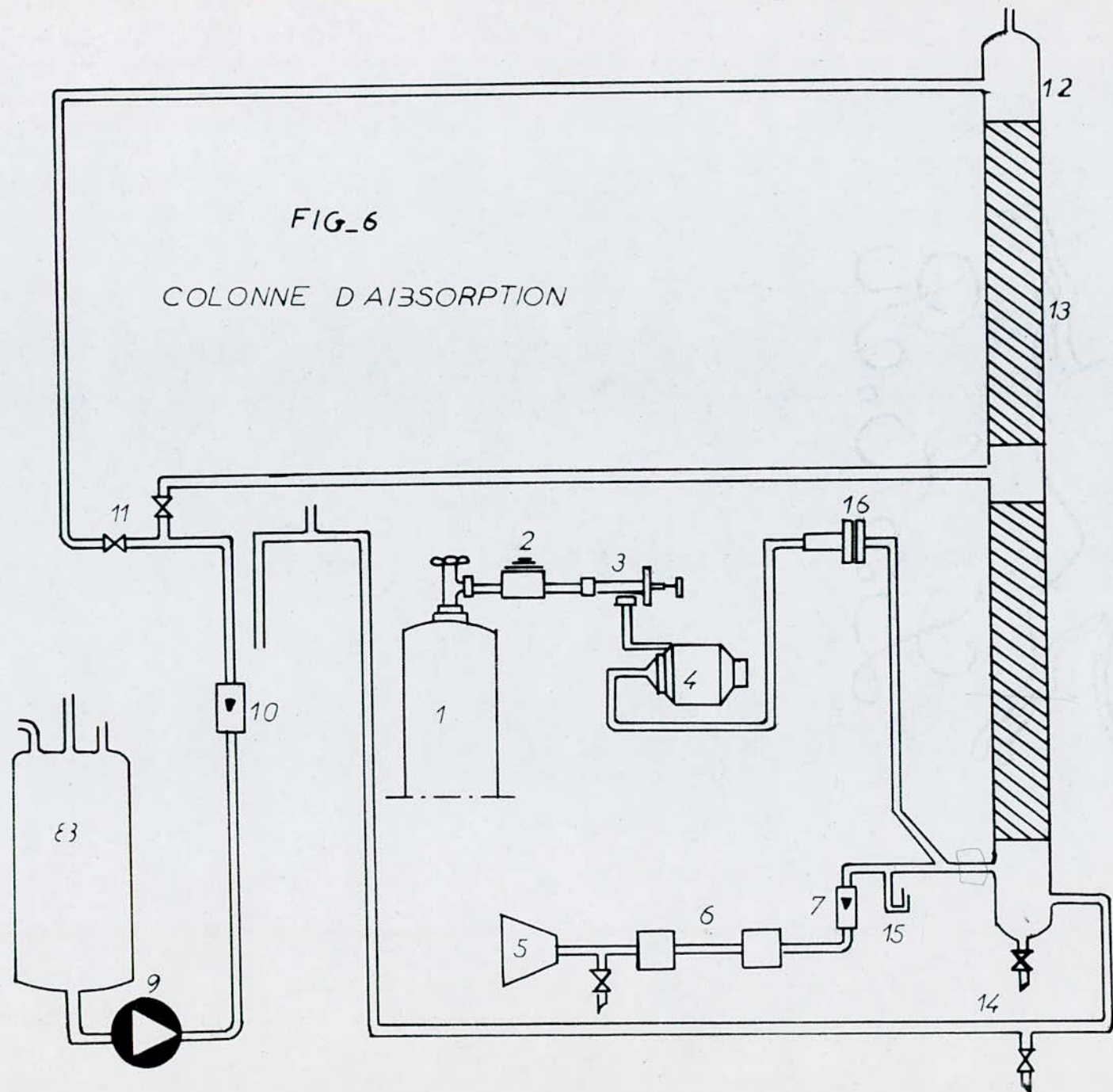
| $G \text{ (Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ | $U_G = \frac{G}{\rho} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ | $\Delta P \cdot 10^2 \text{ (N} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$ | $\frac{\Delta P \cdot 10^2}{Z \cdot U_G} \left( \frac{\text{m eau}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} \right)$ |
|---|---|--|--|
| 0,12  | 0,10  | 1,4  | 21,97  |
| 0,14  | 0,11  | 1,6  | 22,83  |
| 0,16  | 0,13  | 1,9  | 22,93  |
| 0,17  | 0,14  | 2,2  | 24,66  |
| 0,19  | 0,16  | 2,6  | 25,50  |
| 0,21  | 0,17  | 2,9  | 26,77  |
| 0,23  | 0,19  | 3,2  | 26,43  |
| 0,24  | 0,20  | 3,6  | 28,25  |
| 0,26  | 0,21  | 4,2  | 31,38  |
| 0,28  | 0,23  | 4,7  | 32,07  |
| 0,30  | 0,25  | 5,3  | 33,27  |
| 0,32  | 0,26  | 5,8  | 35,01  |
| 0,34  | 0,28  | 6,6  | 36,99  |
| 0,35  | 0,29  | 7,2  | 38,96  |
| 0,38  | 0,31  | 8,2  | 41,51  |
| 0,40  | 0,33  | 9,0  | 42,80  |
| 0,43  | 0,35  | 10,0   | 44,84  |

Tableau ( 3 ) - Perte de charge dans un garnissage sec.

.../...



- 1 bouteille de  $\text{CO}_2$
- 2 résistances chauffantes
- 3 détenteur
- 4 compteur à gaz
- 5 compresseur d'air
- 6 détenteurs
- 7 débitmètre d'air
- 8 bac d'alimentation
- 9 Pompe
- 10 débitmètre de liquide
- 11 vannes d'alimentation
- 12 section calmante
- 13 section garnie
- 14 vannes de vidange
- 15 manomètre à eau
- 16 orifice d'admission du  $\text{CO}_2$



| Grandeur       | diamètre<br>interieur | diamètre<br>exterieur | hauteur          | epaisseur        | aire<br>specifique | porosité   | aire specifique<br>de<br>couche | nombre de<br>pièce par<br>unité de<br>volume |
|----------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|---------------------------------|--|
| Unité          | $10^3 \text{ m}$      | $10^3 \text{ m}$      | $10^3 \text{ m}$ | $10^3 \text{ m}$ | $\text{m}^{-1}$    | %          | $\text{m}^{-1}$                 | $10^{-3} \text{ m}^{-3}$                     |
| Symbole        | $d_i$                 | $d_e$                 | $h$              | $e$              | $a_p$              | $\epsilon$ | $a_c$                           | $N$  |
| Valeur mesurée | 7,8                   | 10,5                  | 10,5             | 1,35             | 1675               | 73         | 452,3                           | 662,63                                       |
| Valeur mesurée | 5                     | 7                     | 7,8              | 1                | 2256               | 68,9       | 701,6                           | 2115,65                                      |

Tableau ( 1 ) - Caractéristiques du garnissage

| Système   | Concentration<br>$\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ | Grandeur            | Densité                         | Viscosité   | Tension Superficielle          |
|---|--|---------------------|---------------------------------|---|--------------------------------|
|   |  | Unité               | $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ | $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ |
|   |  | Symbole             | $\rho_L$                        | $\eta_L$  | $\sigma_L$                     |
| NaOH H <sub>2</sub> O   | 0,5  | $T = 290 \text{ K}$ | 1001,2                          | $1,19 \cdot 10^{-3}$                                | $52,33 \cdot 10^{-3}$          |
| NaHCO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O | 0,6  |                     | 1017,9                          | $1,17 \cdot 10^{-3}$                                | $55,20 \cdot 10^{-3}$          |

Tableau ( 2 ) - Propriétés physico-chimiques



\* Exploitation des résultats :

En reportant graphiquement le rapport  $\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G}$  en fonction du débit G de gaz, nos points expérimentaux se placent sur une droite de pente.

$$A = 8036,27 \text{ Pa. Kg}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

et d'ordonnée à l'origine

$$B = 980,39 \text{ Pa. m}^{-2} \cdot \text{s}$$

l'équation linéaire que suit la perte de charge dans ce garnissage est donc :

$$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = 8036,27 G + 980,39 \quad (61)$$

2.1.2.2- Comparaison avec les résultats de la littérature

Application de la relation d'Ergun [I-3]

Elle s'exprime par :

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_K \eta_G a_P^2 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} U_G + h_B \int_G a_P \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} U_G^2 \quad (I)$$

$$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = h_B a_P \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} G + h_K \eta_G a_P^2 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (62)$$

Ergun propose :

$$h_K = 4,5$$

$$h_B = 0,3$$

La viscosité de l'air  $\eta_G = 17,95 \cdot 10^{-6} \text{ Kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  à T = 290 K

Les caractéristiques du garnissage sont relevées sur le tableau (I)

Nous obtenons l'équation de droite suivante :

$$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = 643,52 G + 121,57 \quad (63)$$

.../...

La combinaison de la droite expérimentale ( 63 ) et de l'équation d'Ergun ( 62 ), permet de calculer les valeurs de  $h_K$  et  $h_B$ .

$$h_B = 8036,27 \frac{\varepsilon^3}{a_p(1-\varepsilon)} \quad (64)$$

$$h_K = 980,39 \frac{\varepsilon^3}{\eta_G a_p^2 (1-\varepsilon)^2} \quad (65)$$

Nous trouvons pour notre garnissage :

$$h_B = 3,75$$

$$h_K = 36,29$$

\* Application de la relation de Braner [I-2,4]

Elle s'exprime par :

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_K a_e^2 F^{2n} \int_G \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} U_G + h_B a_e F^n \int_G \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} U_G^2 \quad (3)$$

Sachant que  $G = \int_G U_G$ , cette expression devient :

$$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = h_B a_e F^n \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} G + h_K a_e^2 F^{2n} \int_G \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (66)$$

avec

$$F = \frac{1 + \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_i} - \frac{1}{3} \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i}$$

$$\varepsilon_i = \left( \frac{d_i}{d_e} \right)^2$$

$$a_e = \frac{6}{d_e}$$

Nous prenons les valeurs de  $h_K$  et  $h_B$  trouvées expérimentalement à savoir :

$$h_K = 36,29$$

$$h_B = 3,75$$

1er Cas : n = 1,9 (valeur proposée par Braner)

Nous obtenons :

$$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = 19749,61 \cdot G + 5909,68 \quad (67)$$



2ème Cas : n proposé par Laurent et Coll. [ I ]

Rapellons l'expression donnant la valeur de n

$$\frac{1}{n} \frac{D}{d_i} = \left( \frac{\xi \cdot D^2}{d_i^2} \right)^{0,75} + \left( 0,01 \frac{\xi \cdot D^2}{d_i^2} \right)^{0,75} \quad (4)$$

Le calcul numérique nous fournit :

$$n = 0,33$$

$$\text{et} \quad \frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = 4226,06 \cdot G + 270,59 \quad (68)$$

Le tableau ci dessous présente l'ensemble des résultats obtenus

|   | G<br>(kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 0,12  | 0,16  | 0,19  | 0,23   | 0,26   | 0,30   | 0,34   | 0,38   | 0,43   |
|---|---|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ergun<br>$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} \cdot 10^2$<br>(mea.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )           |   | 2,03  | 2,29  | 2,49  | 2,75   | 2,95   | 3,21   | 3,47   | 3,73   | 4,06   |
| Brauer<br>n=1,9<br>$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} \cdot 10^2$<br>(mea.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) |   | 84,45 | 92,51 | 98,55 | 106,61 | 112,65 | 120,71 | 128,77 | 136,83 | 146,90 |
| Brauer<br>n=0,33<br>$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G}$<br>(mea.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )           |   | 7,93  | 9,66  | 10,95 | 12,67  | 13,97  | 16,01  | 17,42  | 19,14  | 21,29  |
| nos pts<br>$\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G}$<br>(mea.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )                    |   | 19,84 | 23,12 | 25,57 | 28,85  | 31,31  | 34,59  | 37,87  | 41,15  | 45,25  |

Tableau ( 4 ) - Perte de charge dans un garnissage sec.

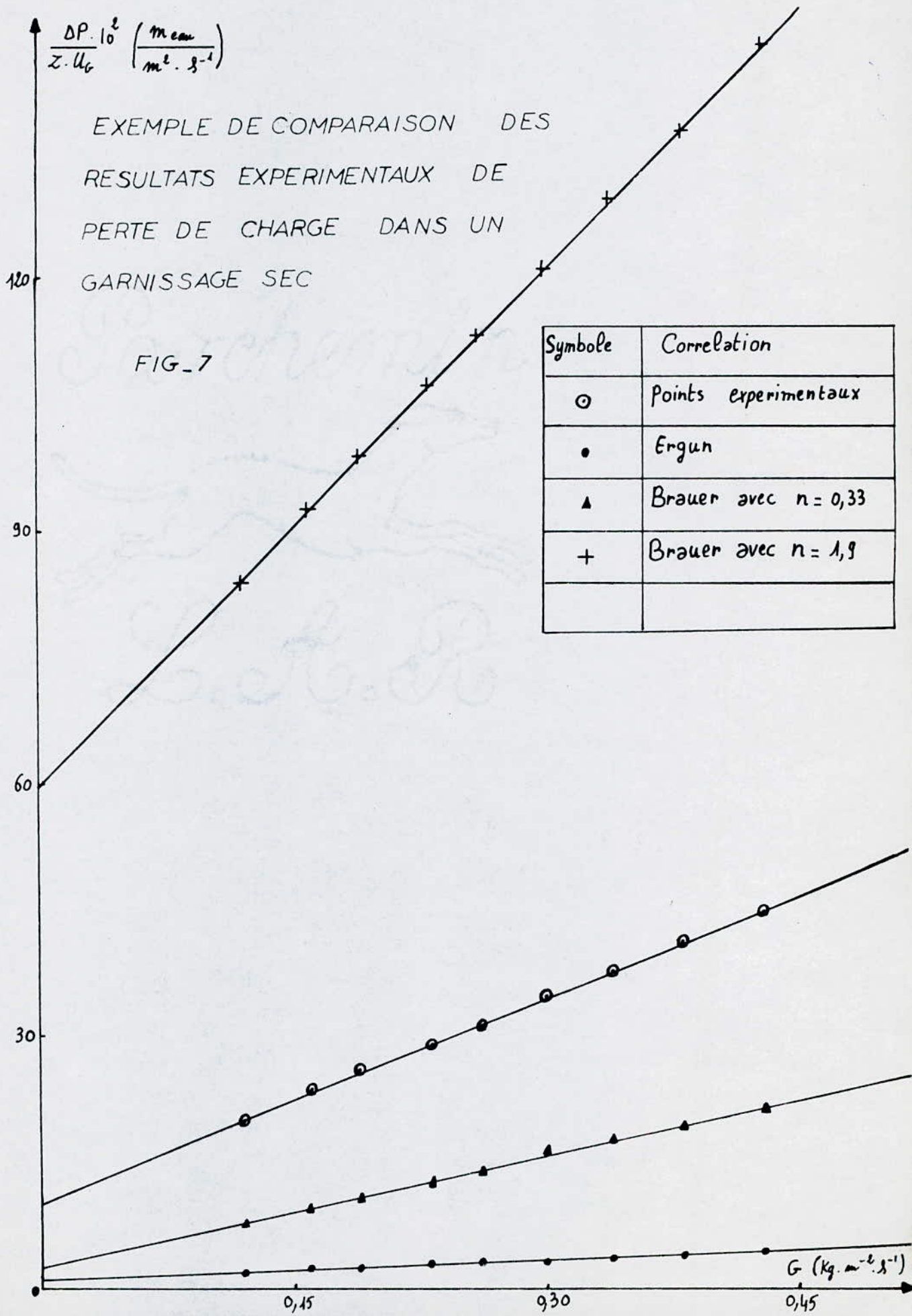
La figure ( 7 ) montre que nos résultats expérimentaux répondant à la forme générale que propose Ergun  $\frac{\Delta P}{Z \cdot U_G} = A \cdot G + B$  mais ne la vérifient pas vu que notre garnissage est constitué d'anneaux Raschig.

Cette figure montre également l'amélioration moyenne apportée par le calcul de la perte de charge à l'aide de la relation de Brauer avec estimation de n par la relation de Laurent, par comparaison à l'application directe des corrélations d'Ergun et de Brauer.

### 2.1.3 - Ecoulement gaz liquide à contre courant en colonne arrosée

#### 2.1.3.1 - Pertes de charge

Nous étudions la perte de charge en fonction du débit de gaz, à débit de liquide constant afin de déterminer les zones de fonctionnement de la colonne et les conditions d'engorgement.





\* Mode opératoire :

- Fixer le débit de liquide (  $L \neq 0$  )
- Augmenter progressivement le débit d'air jusqu'à l'engorgement.
- Noter la perte de charge entre les deux extrémités du garnissage.
- Procéder de la même manière pour les différents débits de liquide

\* Résultats :

Nos résultats expérimentaux sont reportés dans les tableaux ci-dessous.

T = 294 K

Système : NaOH - H<sub>2</sub>O - air

P = 758 mm Hg

Garnissage : a.R.7,4 mm

Z = 0,65 m.

| L = 2,61 Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> |  |                          | L = 4,17 Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> |  |                          |
|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|
| G<br>(Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )    | $\Delta P \cdot 10^{-2}$<br>(N.m <sup>-2</sup> ) | $\ln \frac{\Delta P}{Z}$ | G<br>(Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )    | $\Delta P \cdot 10^{-2}$<br>(N.m <sup>-2</sup> ) | $\ln \frac{\Delta P}{Z}$ |
| 0,12   | 1,6  | 5,50                     | 0,12   | 2,2  | 5,82                     |
| 0,16   | 2,1  | 5,78                     | 0,16   | 3,1  | 6,17                     |
| 0,19   | 3,2  | 6,20                     | 0,19   | 4,3  | 6,49                     |
| 0,23   | 4,8  | 6,60                     | 0,23   | 6,1  | 6,84                     |
| 0,26   | 6,6  | 6,92                     | 0,26   | 7,9  | 7,10                     |
| 0,30   | 8,7  | 7,20                     | 0,30   | 11,2   | 7,45                     |
| 0,34   | 12,9   | 7,59                     | 0,34   | 16,5   | 7,84                     |
| 0,38   | 18,7   | 7,96                     | 0,38   | 27,5   | 8,35                     |
| 0,41   | 32,6   | 8,52                     |  |  |                          |
| 0,44   | 52,8   | 9,00                     |  |  |                          |

| $L = 5,82 \text{ Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  |  |                          | $L = 6,69 \text{ Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  |  |                          |
|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|
| $G$<br>( $\text{Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $\Delta P \cdot 10^{-2}$<br>( $\text{N. m}^{-2}$ ) | $L_n \frac{\Delta P}{Z}$ | $G$<br>( $\text{Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $\Delta P \cdot 10^{-2}$<br>( $\text{N. m}^{-2}$ ) | $L_n \frac{\Delta P}{Z}$ |
| 0,12   | 4,3  | 6,50                     | 0,12   | 5,5  | 6,74                     |
| 0,16   | 5,9  | 6,81                     | 0,16   | 7,6  | 7,06                     |
| 0,19   | 7,7  | 7,08                     | 0,19   | 9,4  | 7,28                     |
| 0,23   | 10,1   | 7,35                     | 0,23   | 13,4   | 7,63                     |
| 0,26   | 15,8   | 7,80                     | 0,26   | 21,0   | 8,08                     |
| 0,30   | 22,5   | 8,15                     |  |  |                          |

Tableau ( 5 ) : Variation de la perte de charge en fonction du débit de gaz pour L fixé.

T = 290 K

Système :  $\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$

P = 760 mm Hg

Garnissage : a.R. 7,4 mm  
 $\text{H}_2\text{O}$  - air

Z = 0,65 m

| $L = 2,61 \text{ Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  |  |                          | $L = 4,17 \text{ Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  |  |                          |
|--|--|--------------------------|--|--|--------------------------|
| $G$<br>( $\text{Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $\Delta P \cdot 10^{-2}$<br>( $\text{N. m}^{-2}$ ) | $L_n \frac{\Delta P}{Z}$ | $G$<br>( $\text{Kg. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $\Delta P \cdot 10^{-2}$<br>( $\text{N. m}^{-2}$ ) | $L_n \frac{\Delta P}{Z}$ |
| 0,12   | 1,9  | 5,68                     | 0,12   | 2,0  | 5,73                     |
| 0,16   | 2,5  | 5,95                     | 0,16   | 2,6  | 5,99                     |
| 0,19   | 3,6  | 6,32                     | 0,19   | 3,7  | 6,34                     |
| 0,23   | 4,6  | 6,56                     | 0,23   | 4,8  | 6,60                     |
| 0,26   | 5,6  | 6,76                     | 0,26   | 6,6  | 6,92                     |
| 0,30   | 7,8  | 7,09                     | 0,30   | 9,6  | 7,30                     |
| 0,34   | 10,4   | 7,38                     | 0,34   | 13,5   | 7,64                     |
| 0,38   | 16,9   | 7,86                     | 0,38   | 25,4   | 8,27                     |
| 0,41   | 23,6   | 8,20                     |  |  |                          |



| L = 5,82 kg . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> |   |                         | L = 6,69 Kg . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> |   |                         |
|---|---|-------------------------|---|---|-------------------------|
| G<br>(kg . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )  | ΔP . 10 <sup>-2</sup><br>(N . m <sup>-2</sup> ) | Ln $\frac{\Delta P}{Z}$ | G<br>(kg . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )  | ΔP . 10 <sup>-2</sup><br>(N . m <sup>-2</sup> ) | Ln $\frac{\Delta P}{Z}$ |
| 0,12  | 2,5   | 5,95                    | 0,12  | 2,6   | 5,99                    |
| 0,16  | 3,0   | 6,13                    | 0,16  | 3,1   | 6,17                    |
| 0,19  | 3,9   | 6,40                    | 0,19  | 4,6   | 6,56                    |
| 0,23  | 6,0   | 6,83                    | 0,23  | 8,1   | 7,13                    |
| 0,26  | 8,4   | 7,16                    | 0,26  | 11,3  | 7,46                    |
| 0,30  | 15,4  | 7,77                    | 0,30  | 20,2  | 8,04                    |
| 0,34  | 24,7  | 8,24                    |   |   |                         |

Tableau (6) : - Variation de la perte de charge en fonction de G pour L fixé.

✧ Exploitation des résultats :

a) Influence du débit de gaz

Les figures ( 8 ) et ( 9 ) représentant la perte de charge en fonction du débit de gaz, à débit de liquide constant, montrent qu'il est possible de distinguer deux zones de fonctionnement de la colonne avant d'atteindre les conditions d'engorgement .

- La première zone peut être caractérisée par une évolution linéaire de la perte de charge

La pente de cette droite est sensiblement égale à celle dans un garnissage sec, ceci est dû aux faibles interactions gaz liquide.

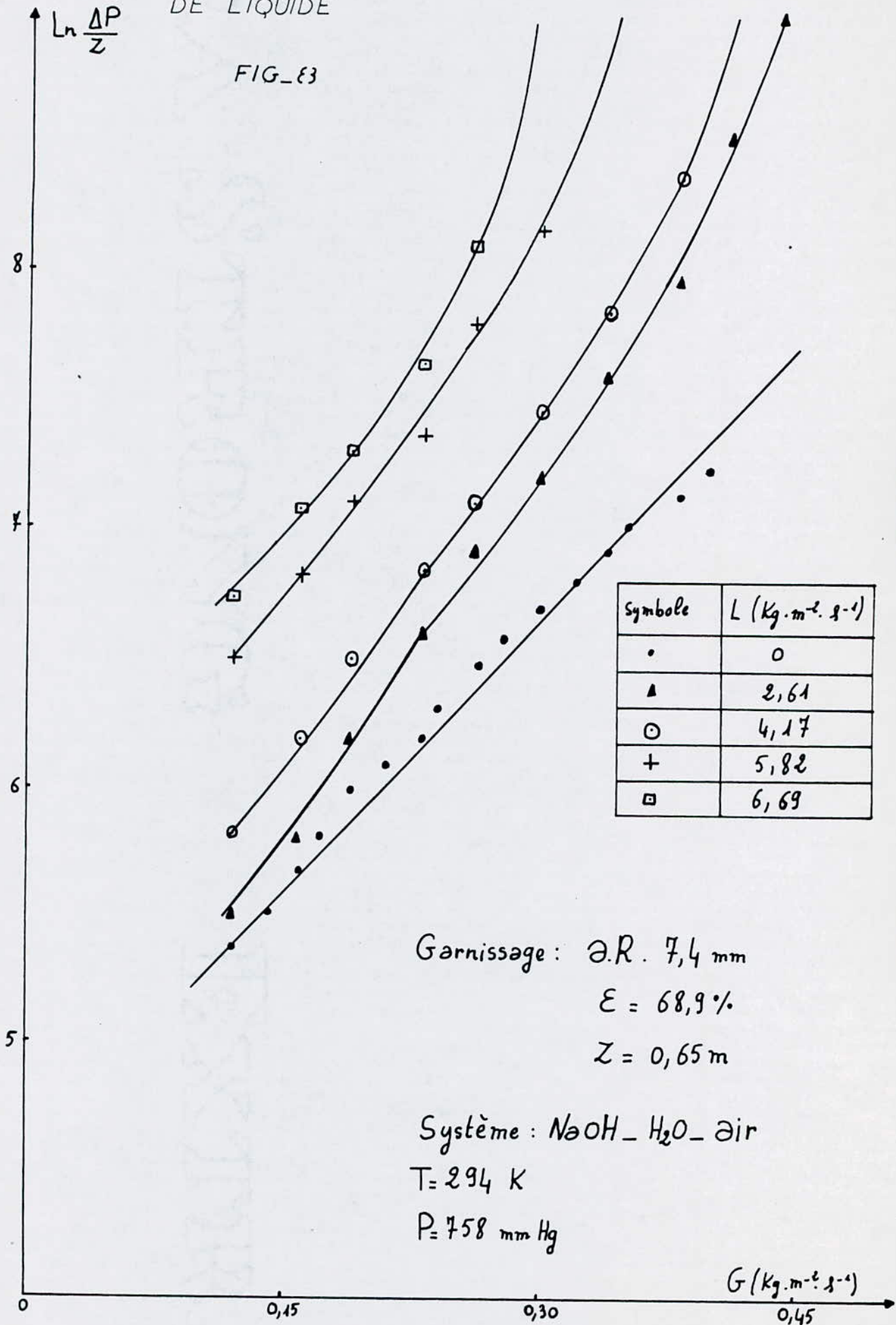
- La seconde zone ( zone de charge ) se traduit par une accumulation de liquide dans les pores du garnissage d'où une augmentation plus rapide de la perte de charge .

L'intersection de ces deux zones est appelée point de charge qui est difficilement décelable ici.

VARIATION DE LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION  
DU DEBIT DE GAZ POUR DIFFERENTS DEBITS

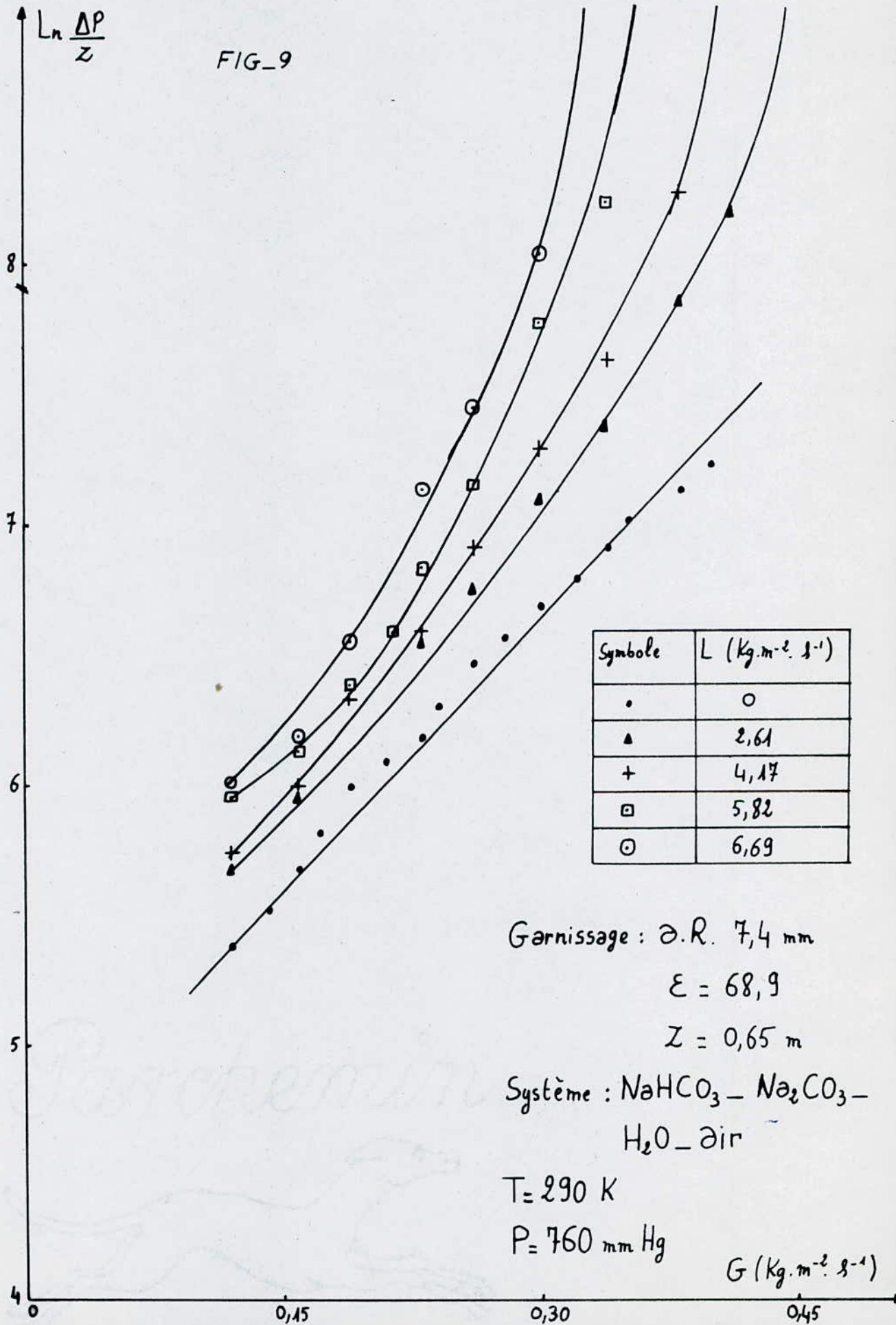
DE LIQUIDE

FIG\_83





VARIATION DE LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION  
DU DEBIT DE GAZ POUR DIFFERENTS DEBITS  
DE LIQUIDE



Enfin, lorsque le débit de gaz augmente encore, la phase gazeuse devient discontinue, la phase liquide tend à occuper tout le volume poreux. La colonne s'engorge.

b) Influence du débit de liquide

Pour un débit de gaz constant, la perte de charge augmente avec le débit de liquide car la rétention capillaire augmente avec le débit de liquide.

c) Influence de la nature du liquide

Nous constatons que la perte de charge est plus importante dans le cas du système  $\text{NaOH} - \text{H}_2\text{O} - \text{air}$  que dans le système  $\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O} - \text{air}$ .

En effet la viscosité du premier système étant plus élevée la rétention est plus grande et par conséquent la perte de charge est plus importante.

d) Influence de la taille du garnissage

En comparant la perte de charge que nous obtenons avec le garnissage de diamètre nominal de 7,4 mm et celle trouvée pour un garnissage de diamètre nominal de 10,5 voir [26,] Nous déduisons que la perte de charge augmente quand la dimension du garnissage diminue. Ceci est dû au fait qu'une diminution de la taille du garnissage fait augmenter la rétention .

2.1.3.2 - Engorgement :

Les tableaux ( 7 ) et ( 8 ) englobent les débits maximaux d'engorgement expérimentaux et ceux obtenus par les corrélations de Zenz et Lavin [1, 9] et de Takahashi [1, 10] et également ceux donnés par la courbe de labo [2, 8]

Nous constatons que c'est la courbe de labo qui donne des résultats plus proches des nôtres.

.../...



T = 294 K  
P = 758 mm Hg

Système : NaOH - H<sub>2</sub>O - air  
Garnissage : a.R 7,4 mm  
Z = 0,65 m

| L<br>(Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | G <sub>E</sub> Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> |      |           |      |
|---|--|------|-----------|------|
|   | Expérience   | Zenz | Takahashi | Labo |
| 2,08  | 0,44   | 0,99 | 2,29      | /    |
| 2,61  | 0,44   | 0,92 | 2,20      | 0,89 |
| 3,35  | 0,41   | 0,84 | 2,09      | 0,76 |
| 4,17  | 0,38   | 0,76 | 1,99      | 0,69 |
| 5,05  | 0,34   | 0,69 | 1,89      | 0,52 |
| 5,82  | 0,30   | 0,63 | 1,82      | 0,50 |
| 6,69  | 0,26   | 0,58 | 1,74      | 0,47 |
|   |  |      |           |      |

Tableau ( 7 ) - Comparaison des débits maximaux d'engorgement.

T = 290 K  
P = 760 mm Hg

Système : NaHCO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O - air  
Garnissage : a. R 7,4 mm  
Z = 0,65 m

| L<br>(Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | G <sub>E</sub> Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> |      |           |      |
|---|--|------|-----------|------|
|   | Expérience   | Zenz | Takahashi | Labo |
| 2,08  | 0,44   | 1,02 | 2,34      | /    |
| 2,61  | 0,41   | 0,94 | 2,25      | 0,92 |
| 3,35  | 0,41   | 0,86 | 2,14      | 0,82 |
| 4,17  | 0,38   | 0,78 | 2,03      | 0,71 |
| 5,05  | 0,34   | 0,71 | 1,94      | 0,63 |
| 5,82  | 0,34   | 0,65 | 1,86      | 0,48 |
| 6,69  | 0,30   | 0,60 | 1,78      | 0,46 |

Tableau ( 8 ) : - Comparaison des débits maximaux d'engorgement.

.../...

2.I.4- Rétention

2.I.4.I- Détermination de la rétention capillaire

\* Mode opératoire

Nous avons adopté le procédé suivant :

- Laver et sécher à l'étude le garnissage constitué d'anneaux Raschig
- Remplir de garnissage une éprouvette de 1000 ml.
- Peser l'élément contenant le garnissage sec.
- Remplir de liquide l'éprouvette contenant le garnissage, la vider et l'égoutter pendant 10 mn, puis la peser de nouveau.

L'augmentation de poids indique la valeur de la rétention capillaire.

\* Résultats expérimentaux :

La rétention capillaire nous est donnée par le rapport :

$$\beta_c = \frac{V_L}{\varepsilon \cdot V} \quad (69)$$

Nos résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

| Diamètre nominal | 10,5 | 7,4  | 10 <sup>3</sup> . m |      |
|------------------|------|------|---------------------|------|
| $\beta_c$        | 3,56 | 5,37 | %                   | Eau  |
|                  |      | 6,38 | %                   | NaOH |

Tableau ( 9 ) - Rétention Capillaire.

\* Application de la relation d'EOTVOS [I, II]

Nous calculons le nombre d'EOTVOS (  $EO = \frac{\rho_L \cdot g_m \cdot d^2}{\sqrt{L}}$  )

que nous reportons sur graphe de la fig ( I ),  
et nous déduisons la rétention capillaire.

Les résultats sont rassemblées dans le tableau suivant :

.../...



|                  |      |      |                    |      |
|------------------|------|------|--------------------|------|
| Diamètre nominal | 10,5 | 7,4  | 10 <sup>3</sup> .m |      |
| $\beta_c$        | 5,48 | 6,89 | %                  | Eau  |
|                  |      | 6,53 |                    | NaOH |

Tableau (10) - rétention capillaire donnée par courbe d'OETVOS.

\* Exploitation des résultats

En comparant nos résultats avec la courbe de charpentier fig ( I ) nous constatons que nos valeurs cadrent cette courbe à  $\pm 25 \%$

Nous constatons également sur le tableau (9) que le taux de rétention capillaire augmente quand la dimension du garnissage diminue et aussi quand la viscosité du liquide augmente.

2.I.4.2- Détermination de la rétention non capillaire

\* Mode opératoire :

Nous avons mesuré le taux de rétention non capillaire par la technique de collection de liquide en bas de la colonne avec une attente de 10 mm.

Cette technique consiste à recueillir pendant 10 mm le liquide contenu dans le garnissage en fonctionnement par fermeture simultanée de l'alimentation et de l'évacuation en liquide de la colonne.

\* Résultats expérimentaux :

Nous présentons dans les tableaux suivants les résultats des taux de rétention non capillaire relatifs à un systèmes non visqueux (eau) obtenus avec deux garnissages 10,5 mm et 7,4 mm et à un système visqueux (NaOH) obtenus avec un garnissage de 7,4 mm de diamètre nominal.

La rétention non capillaire est donnée par :

$$\beta_{nc} = \frac{V_L}{\epsilon \cdot V} \quad ( 69 )$$

Z = 1,3 m

T = 298 K

Garnissage : a.R. 10,5 mm

P = 758 mm Hg

Système : eau - air

| $G$ (kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) / $L$ (kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 0     | 0,09  | 0,26  | 0,32  | 0,43  | 0,50  |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2,08  | 6,43  | 6,36  | 6,39  | 6,34  | 6,90  | 7,55  |
| 2,61  | 7,78  | 7,43  | 7,48  | 7,90  | 7,83  | 9,64  |
| 3,35  | 9,01  | 8,64  | 8,71  | 9,17  | 9,29  | 11,96 |
| 4,17  | 9,83  | 9,83  | 10,22 | 10,03 | 10,57 | 12,85 |
| 5,05  | 11,31 | 11,20 | 10,96 | 11,15 | 12,08 | 15,33 |
| 5,82  | 12,26 | 11,78 | 12,08 | 12,15 | 13,24 | 18,07 |
| 6,69  | 13,52 | 13,33 | 13,24 | 14,29 | 15,45 | /     |

Tableau ( II ) : - Rétention non capillaire .

Z = 0,65 m

T = 290 K

Garnissage : a.R. 7,4 mm

P = 762 mm Hg

Système : eau - air

| $G$ (kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) / $L$ (kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 0     | 0,09  | 0,26  | 0,31  | 0,42  | 0,49  |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2,08  | 10,83 | 10,83 | 11,32 | 11,32 | 12,30 | 12,80 |
| 2,61  | 13,29 | 13,29 | 13,29 | 13,78 | 14,27 | 17,22 |
| 3,35  | 15,26 | 15,26 | 15,75 | 15,75 | 16,73 | 17,72 |
| 4,17  | 17,23 | 17,72 | 18,21 | 18,21 | 19,69 | 21,66 |
| 5,05  | 19,69 | 19,69 | 19,69 | 21,16 | 23,13 | 24,61 |
| 5,82  | 22,15 | 21,66 | 23,13 | 23,62 | 24,61 | 25,59 |
| 6,69  | 24,11 | 24,61 | 24,11 | 25,59 | 26,08 | 30,02 |

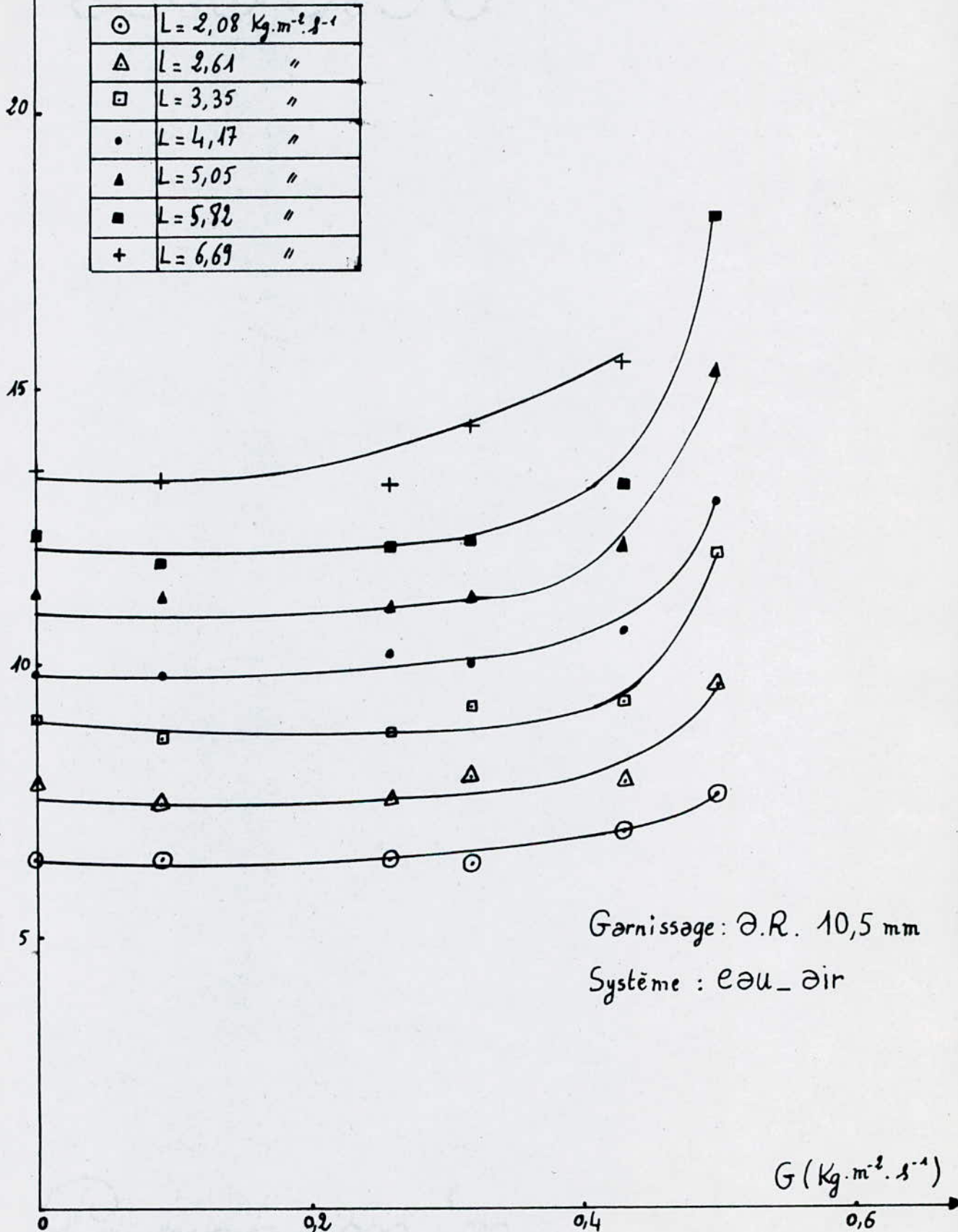
Tableau ( I2 ) - Rétention non capillaire.

.../...



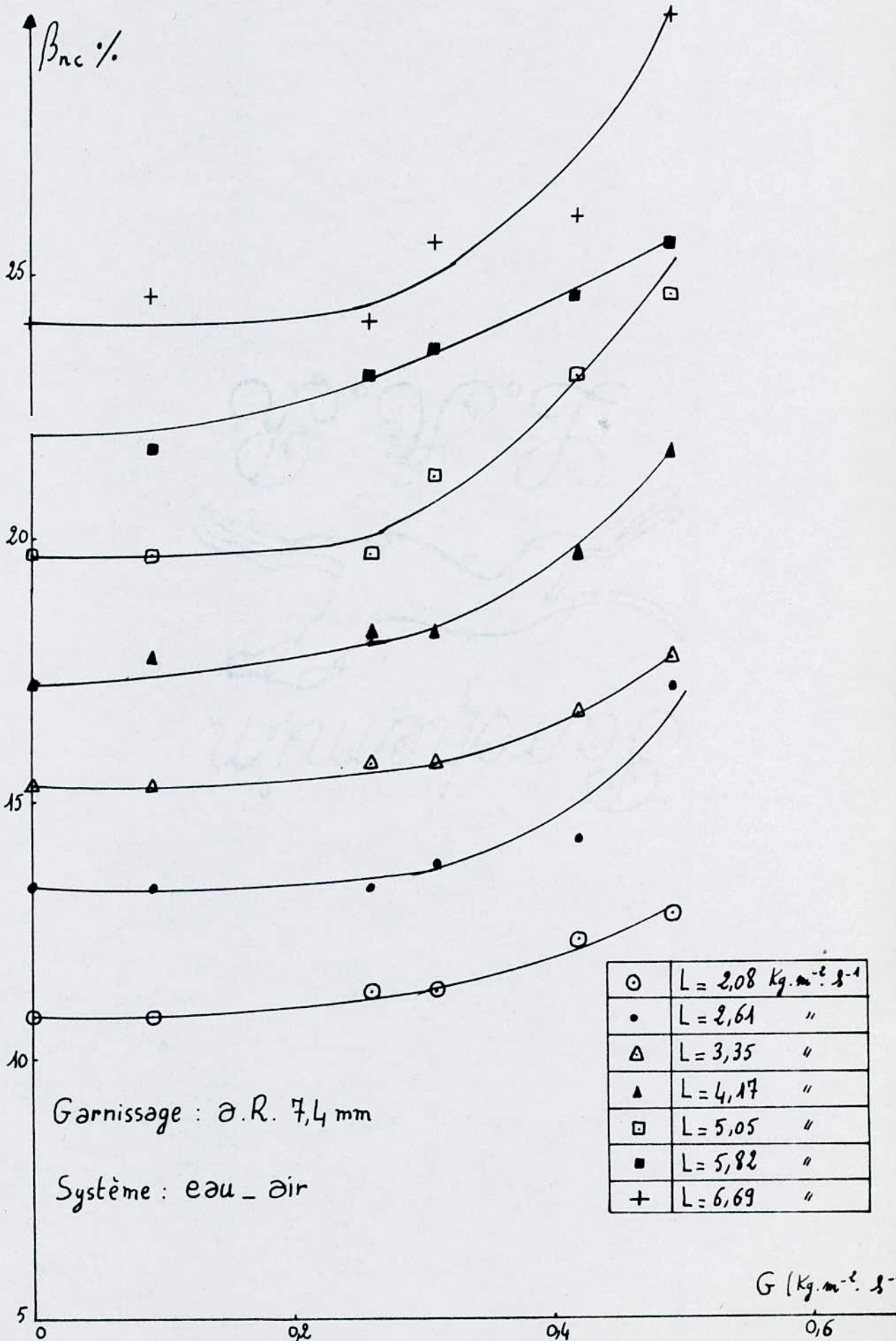
$\beta_{nc}\%$  VARIATION DU TAUX DE RETENTION EN FONCTION  
DU DEBIT DE GAZ

FIG\_10



VARIATION DU TAUX DE RÉTENTION EN FONCTION  
DU DEBIT DE GAZ

FIG\_11





Z = 0,65 m

T = 290 K

Garnissage : a.R. 7,4 mm

P = 762 mm Hg

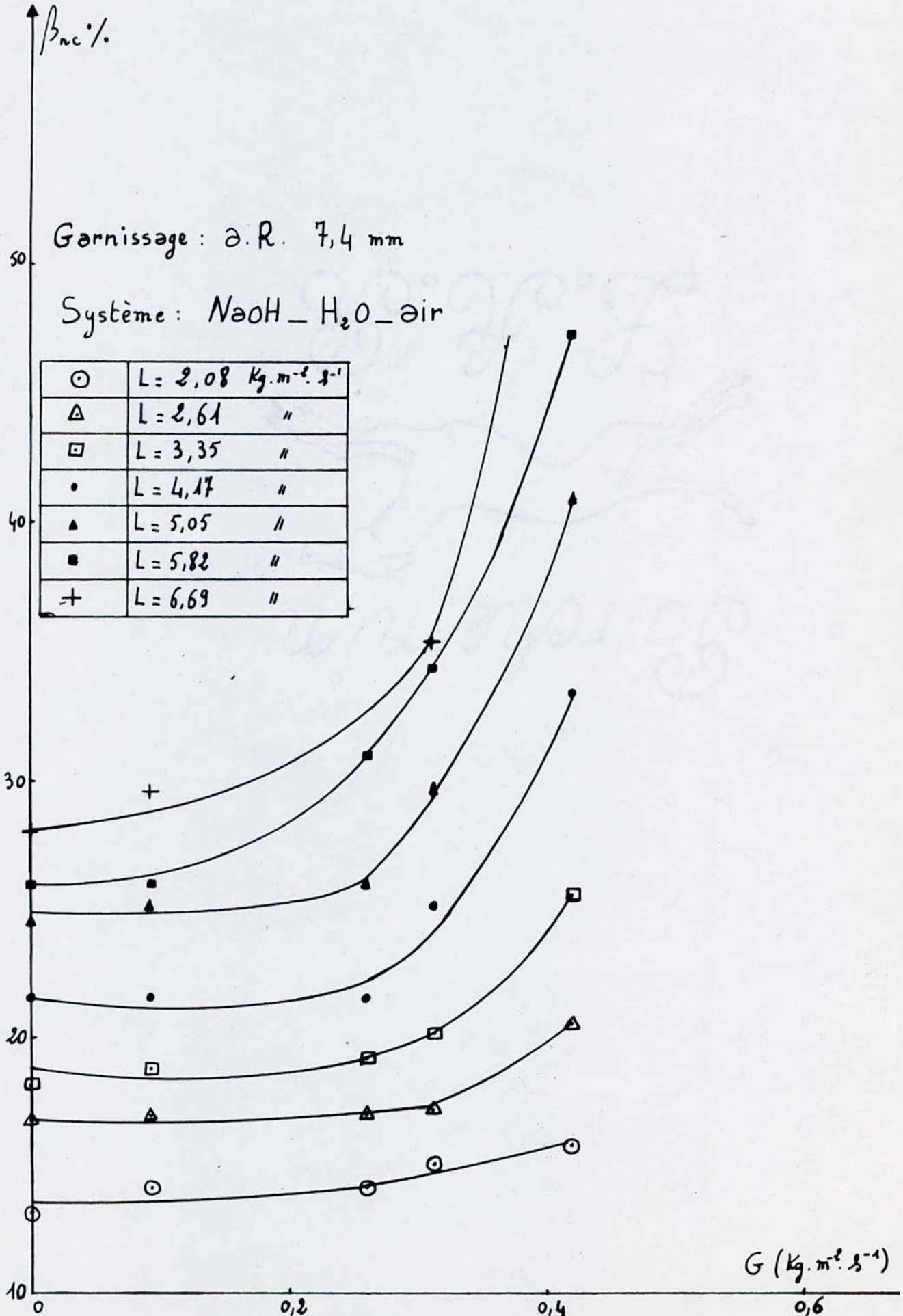
Système : NaOH - H<sub>2</sub>O - air

| $G$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )<br>$L$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 0     | 0,09  | 0,26  | 0,31  | 0,42  |  | B <sub>nc</sub> % |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------------------|
| 2,08   | 13,29 | 14,27 | 14,27 | 15,26 | 15,75 |  |                   |
| 2,61   | 16,73 | 16,98 | 16,98 | 17,23 | 20,67 |  |                   |
| 3,35   | 18,21 | 18,70 | 19,19 | 20,18 | 30,51 |  |                   |
| 4,17   | 21,66 | 21,66 | 21,66 | 25,10 | 33,47 |  |                   |
| 5,05   | 24,61 | 25,10 | 26,08 | 29,53 | 40,85 |  |                   |
| 5,82   | 26,08 | 26,08 | 31,01 | 34,45 | 47,25 |  |                   |
| 6,69   | 28,05 | 29,53 | 31,01 | 35,44 | /     |  |                   |

Tableau ( I3 ) - Rétention non capillaire

VARIATION DU TAUX DE RETENTION EN FONCTION  
DU DEBIT DE GAZ

FIG\_12





\* Exploitation des résultats:

Nous montrerons l'influence des débits liquide et gazeux, de la taille du garnissage et de la nature de la phase liquide.

a) Influence des débits gazeux et liquides:

Nous présentons sur les figures ( I0 ) , ( II ) et ( I2 ) les résultats des taux de rétention non capillaire relatifs au système eau-air obtenus avec les deux dimensions de garnissage, ainsi que ceux du système NaOH - air.

Pour un débit liquide donné, lorsque le débit gazeux augmente. Nous remarquons qu'à contre courant la rétention non capillaire demeure constante jusqu'au point de charge puis croit brusquement jusqu'à l'engorgement sous l'effet du frottement gazeux.

Nous constatons aussi sur la fig ( I3 ) que le taux de rétention non capillaire augmente lorsque le débit liquide croit à débit de gaz nul.

b) Influence de la forme et de la taille du garnissage

En traçant la courbe  $\beta_{nc}$  en fonction du débit spécifique de liquide pour un débit de gaz nul, nous obtenons une droite de pente :

$$a_1 = 0,64 \quad \text{et} \quad a_2 = 0,68$$

$$\text{et d'ordonnée à l'origine } A_1 = 4 \cdot 10^{-2} \quad \text{et} \quad A_2 = 6 \cdot 10^{-2}$$

respectivement pour le garnissage de diamètre nominal

$$d_1 = 10,5 \text{ mm et } d_2 = 7,4 \text{ mm}$$

Nos résultats expérimentaux vérifient donc la relation /

$$\beta_{nc} = A L^a \quad ( I4 )$$

et concordent avec ceux de charpentie [2, II ]

.../...

Tableau I4 - Valeur expérimentales de A et a (charpentier)

| Caractéristiques du garnissage d'a. R. | Nature du liquide | $10^2 \cdot A$ | a    |
|--|-------------------|----------------|------|
| d = 6,4 mm<br>Verre pyrex              | Eau               | 4,83           | 0,66 |
| d = 10,3 mm<br>Verre pyrex             | Eau               | 3,67           | 0,67 |
| d = 10,3 mm<br>Verre pyrex silicé      | Eau               | 1,96           | 0,78 |
| d = 22 mm<br>Polythéne                 | Eau               | 1,15           | 0,82 |

L'influence de la taille du garnissage sur  $\beta_{nc}$  est bien mise en évidence sur la fig ( I3 ) et aussi sur les fig ( I0 ) et fig ( II )

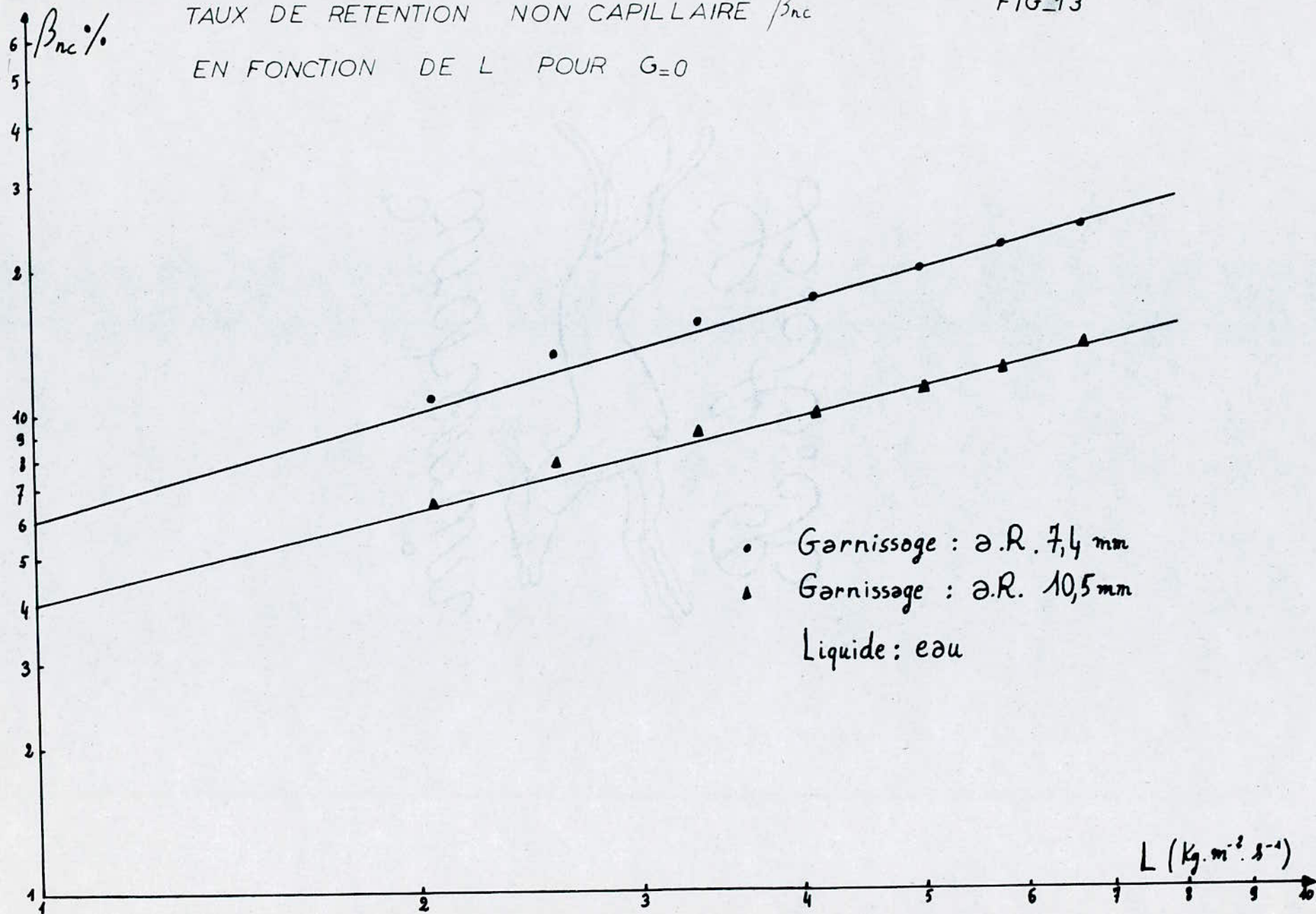
La rétention non capillaire augmente quand la dimension du garnissage diminue c'est à dire lorsque les passages offerts au liquide deviennent plus étroits.

d) Influence de la nature du liquide

Nous montrons sur les fig ( II ) et ( I2 ) que le liquide visqueux donne toujours les taux de rétention non capillaire les plus forts.



TAUX DE RETENTION NON CAPILLAIRE  $\beta_{nc}$   
 EN FONCTION DE L POUR  $G=0$



2.1.4.2.1- Comparaison avec les résultats de littérature.

\*Application de l'équation d'Otaka et Okada [I, II - I2]

La formule proposée par Otaka et Okada est :

$$\beta_{nc} = \frac{1,295}{\varepsilon} \left( \frac{d \cdot L}{\eta_L} \right)^{0,676} \left( \frac{d^3 \cdot g \cdot \rho_L^2}{\eta_L^2} \right)^{-0,44} a_g (1 - \varepsilon) d \quad (II)$$

rappelons que les conditions d'application de cette relation sont :

$$G = 0$$

$$R_e > 10$$

Pour le système eau-air et avec le garnissage d'anneaux Raschig de 10,5 mm de diamètre nominal, nous avons travaillé dans la gamme de Reynolds :

$$21,11 < R_e < 67,91$$

Les caractéristiques du garnissage sont données dans le tableau ( I ), la viscosité de l'eau à T = 298 K est :  $\eta_L = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Nous obtenons :

$$\beta_{nc} = 0,0332937 \cdot L^{0,676} \quad (70)$$

Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci dessous.

|  |      |      |      |      |       |       |       |
|--|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| $L (\text{kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 2,08 | 2,61 | 3,35 | 4,17 | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
| $\beta_{nc \text{ expérimentale}} (\%)$    | 6,43 | 7,78 | 9,01 | 9,83 | 11,31 | 12,26 | 13,52 |
| $\beta_{nc \text{ calculée}} (\%)$         | 5,46 | 6,37 | 7,54 | 8,74 | 9,95  | 10,95 | 12,03 |

Tableau ( I5 ) Comparaison des taux de rétention non capillaire

La fig ( I4 ) montre que l'équation d'Octake et Okada est en accord avec nos résultats à  $\pm 25\%$  près.

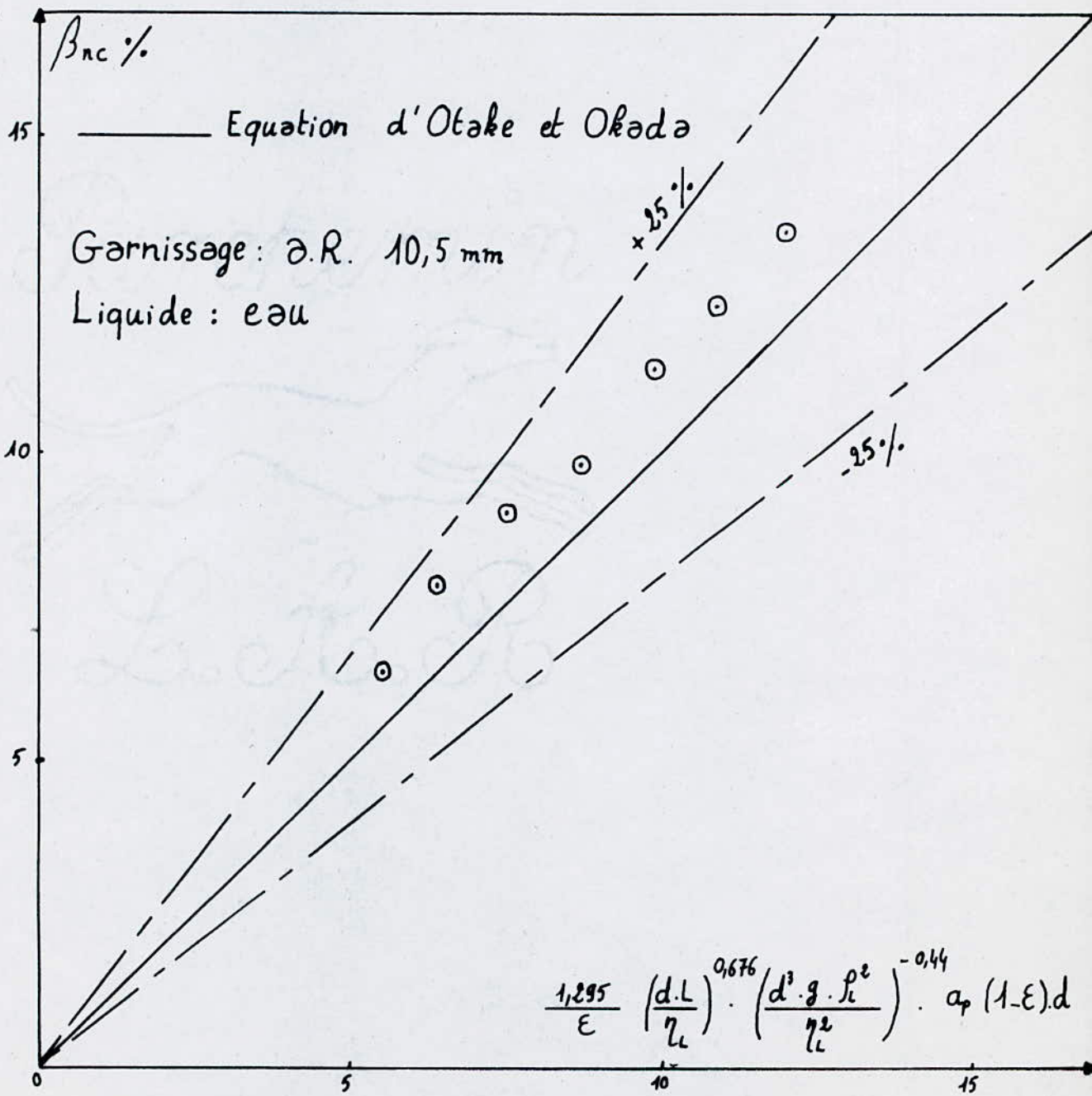
Pour le système eau-air et avec le garnissage d'anneaux Raschig de 7,4 mm de diamètre nominal, nous avons travaillé dans la gamme de Reynolds :

$$14,73 < R_e < 47,37$$



FIG\_14

COMPARAISON DE NOS RESULTATS AVEC L'EQUATION  
D'OTAKE ET OKADA



Les caractéristiques du garnissage sont données dans le tableau ( I ), la viscosité de l'eau à T = 290 K est  $\eta_L = 1,10 \cdot 10^{-3}$  (Kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>)

Nous trouvons l'équation :

$$\beta_{nc} = 0,0480513 \cdot L^{0,676} \quad (71)$$

Le tableau suivant présente les résultats obtenus :

|  |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )           | 2,08  | 2,61  | 3,35  | 4,17  | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
| $\beta_{nc}$ (%)<br><small>(expérimentale)</small> | 10,83 | 13,29 | 15,26 | 17,23 | 19,69 | 22,15 | 24,11 |
| $\beta_{nc}$ (%)<br><small>(calculée)</small>      | 7,88  | 9,19  | 10,88 | 12,62 | 14,36 | 15,80 | 17,37 |

Tableau ( I6 ) - Comparaison du taux de rétention non capillaire

La fig ( I5 ) montre que l'équation d'Octake et Okada est en accord avec nos résultats à  $\pm 30$  % près.

\* Application de relation de Tichy [ I, I5 ]

C'est une équation qui prévoit l'évolution de la rétention non capillaire en fonction du débit de gaz pour un débit liquide donné.

$$\frac{G}{G_E} = \frac{\beta_G^3 - \beta_e^3}{\beta_{GE}^3 - \beta_e^3} \left[ \frac{(1 - \beta_G)}{(1 - \beta_{GE})} \cdot \frac{\beta_{GE}}{\beta_G} \right]^3 \quad (I5)$$

- Détermination de  $G_E$

Le débit de gaz à l'engorgement est estimé à partir d'une des corrélations générales de la littérature.

Pour nos calculs nous choisissons la corrélation de Zenz et Lavin [ I, 9 ] .

- Détermination de  $\beta_0$

Nous calculons la rétention non capillaire à débit de gaz nul à l'aide de la relation d'Okada et Okada [ I, II - I2 ]

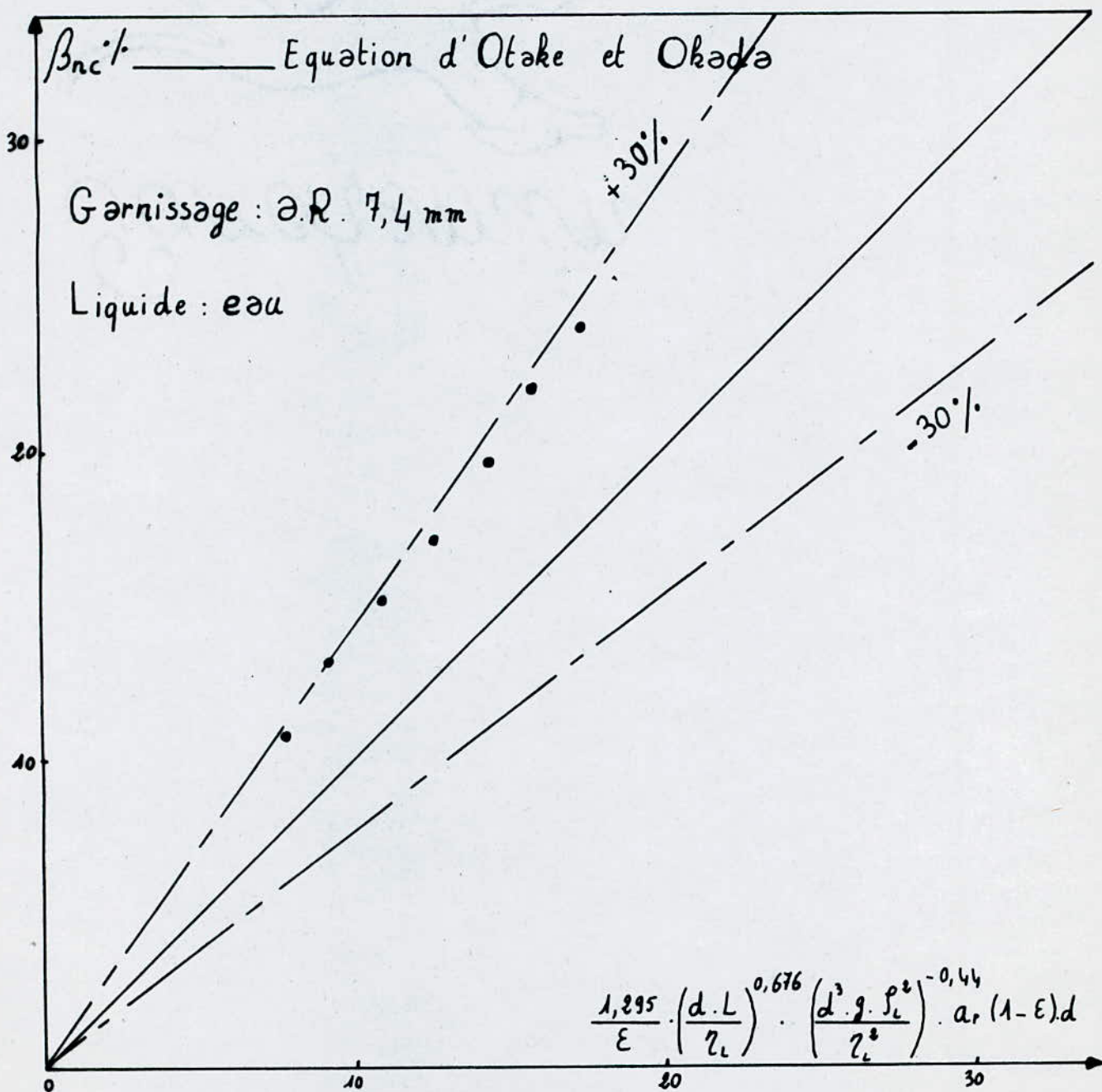
• Détermination de  $\beta_e$  et  $\beta_{GE}$

Les fonctions reliant  $\beta_0$ ,  $\beta_{GE}$  et  $\beta_e$  sont proposées par Kolar [ I, I6 ] sous la forme :



FIG\_15

COMPARAISON DE NOS RESULTATS AVEC L'EQUATION  
D'OTAKE ET OKADA



$$\beta_e = 1,044 \beta_o - 0,009 \quad (16)$$

$$\beta_{GE} = (\beta_e)^{0,75} \quad (17)$$

Les caractéristiques du garnissage étant relevées sur le tableau ( I ) nous obtenons les résultats suivants pour :

Z = 1,3 m

T = 298 K

Garnissage : a.R 10,5 mm

P = 758 mm Hg

Système : eau air

|  |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $L \text{ (Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$   | 2,08  | 2,61  | 3,35  | 4,17  | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
| $G_E \text{ (Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 1,47  | 1,38  | 1,28  | 1,18  | 1,09  | 1,02  | 0,95  |
| $\beta_o \cdot 10^2$                                       | 5,46  | 6,37  | 7,54  | 8,74  | 9,95  | 10,95 | 12,03 |
| $\beta_e \cdot 10^2$                                       | 4,80  | 5,75  | 6,97  | 8,22  | 9,49  | 10,53 | 11,66 |
| $\beta_{GE} \cdot 10^2$                                    | 10,25 | 11,74 | 13,56 | 15,35 | 17,10 | 18,48 | 19,95 |

Tableau ( 17 ) - Différents taux de rétention

La résolution de l'équation du 6ème degré à une inconnue est effectuée à la calculatrice programmable ; le résultat retenu correspond à la racine réelle compatible avec l'ordre de grandeur de la rétention expérimentale dans le garnissage.

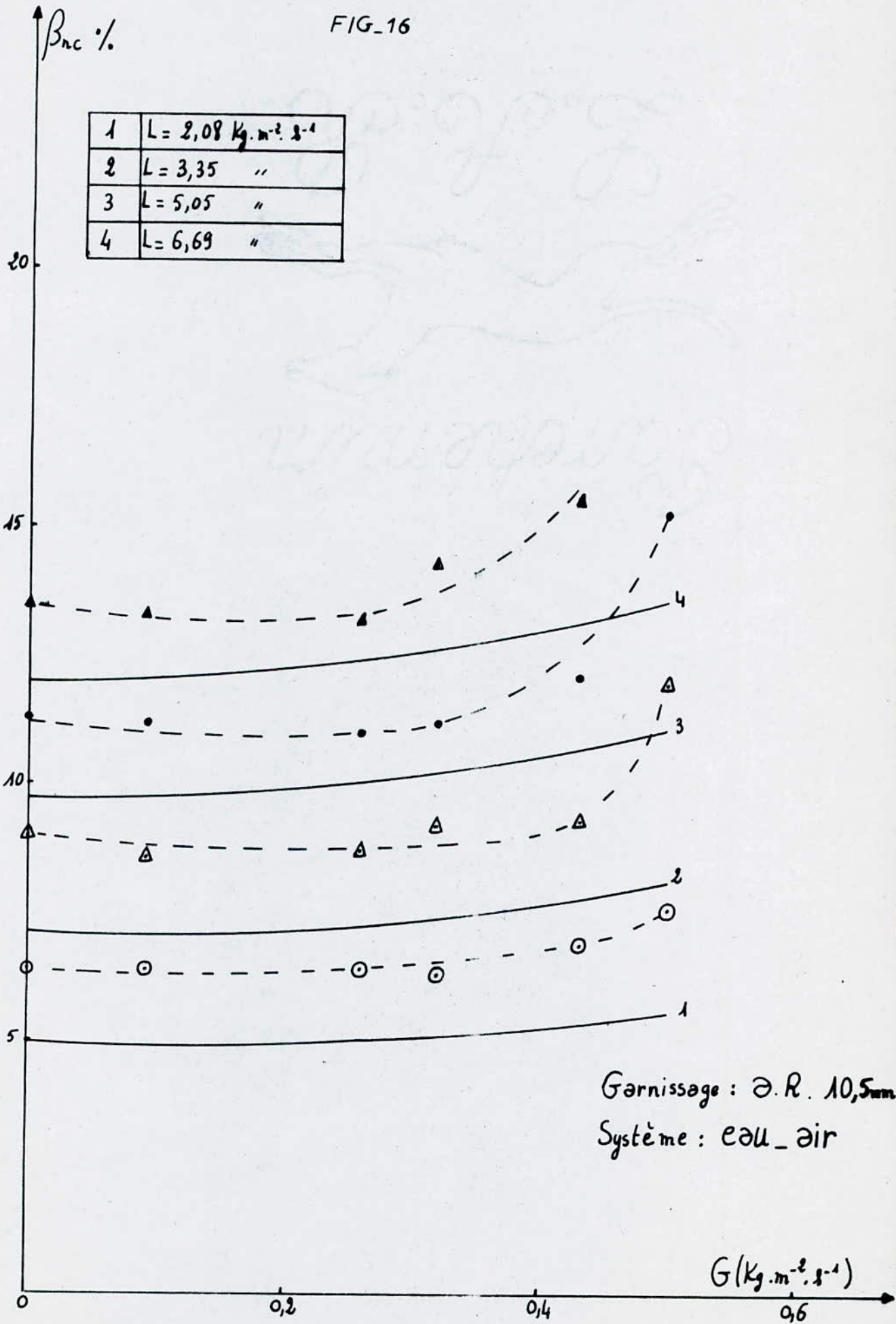
Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

|  |      |      |      |      |       |       |       |
|--|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| $L \text{ (Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 2,08 | 2,61 | 3,35 | 4,17 | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
| $G \text{ (Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ |      |      |      |      |       |       |       |
| 0  | 4,80 | 5,75 | 6,97 | 8,22 | 9,49  | 10,53 | 11,66 |
| 0,09   | 4,88 | 5,85 | 7,10 | 8,38 | 9,68  | 10,75 | 11,91 |
| 0,26   | 5,05 | 6,06 | 7,36 | 8,70 | 10,07 | 11,20 | 12,43 |
| 0,32   | 5,12 | 6,15 | 7,47 | 8,83 | 10,23 | 11,38 | 12,64 |
| 0,43   | 5,25 | 6,31 | 7,68 | 9,09 | 10,55 | 11,75 | 13,07 |
| 0,50   | 5,34 | 6,45 | 7,82 | 9,27 | 10,76 | 12,01 | 13,37 |

Tableau ( 18 ) - Taux de rétention donné par la relation de Tichy.



COMPARAISON DES TAUX DE RETENTION NON  
CAPILLAIRES EXPERIMENTAUX ET THEORIQUES



Z = 0,65 m

T = 290 K

Garnissage : a.R. 7,4 mm

P = 762 mm Hg

Système : eau air

|  |      |      |       |       |       |       |       |
|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $L$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )   | 2,08 | 2,61 | 3,35  | 4,17  | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
| $G_E$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 1,01 | 0,94 | 0,85  | 0,77  | 0,70  | 0,64  | 0,59  |
| $\beta_o \cdot 10^2$                         | 7,88 | 9,19 | 10,88 | 12,62 | 14,36 | 15,80 | 17,37 |
| $\beta_e \cdot 10^2$                         | 7,33 | 8,69 | 10,46 | 12,28 | 14,09 | 15,60 | 17,23 |
| $\beta_{GE} \cdot 10^2$                      | 4,45 | 5,06 | 5,82  | 6,56  | 7,27  | 7,85  | 8,46  |

Tableau ( 19 ) - Différents taux de rétention

Les valeurs de la rétention non capillaire déduits à partir de la relation de Tichy sont reportées dans le tableau suivant :

| $L$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 2,08  | 2,61  | 3,35  | 4,17  | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $G$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 2,08  | 2,61  | 3,35  | 4,17  | 5,05  | 5,82  | 6,69  |
| 0  | 7,33  | 8,69  | 10,46 | 12,28 | 14,09 | 15,60 | 17,23 |
| 0,09                                       | 7,82  | 8,79  | 10,61 | 12,49 | 14,76 | 15,87 | 17,59 |
| 0,26                                       | 8,22  | 9,02  | 10,97 | 12,97 | 15,05 | 16,12 | 18,02 |
| 0,31                                       | 8,79  | 9,77  | 11,16 | 13,99 | 16,21 | 18,40 | 19,26 |
| 0,42                                       | 9,14  | 10,12 | 11,57 | 13,99 | 16,21 | 18,40 | 19,26 |
| 0,49                                       | 10,12 | 10,88 | 12,41 | 14,22 | 16,72 | 19,20 | 20,45 |

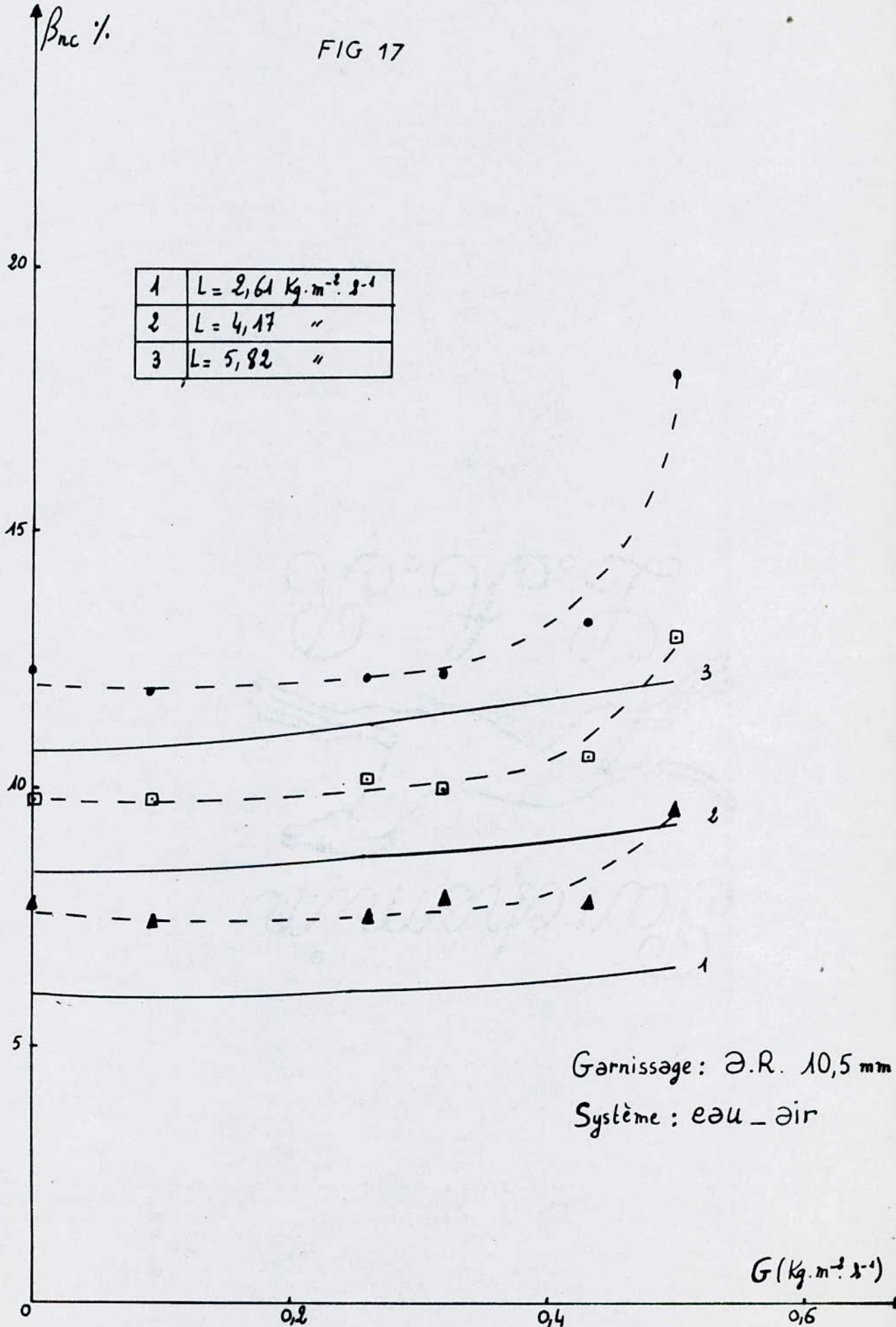
Tableau ( 20 ) - Taux de rétention donné par la relation de Tichy

Les figures ( 16 ) et ( 17 ) présentent une comparaison de nos résultats avec ceux de Tichy [ I, 15 ]. Nous remarquons que les résultats de Tichy sont toujours inférieurs aux nôtres, ce qui n'est pas surprenant, compte tenu de la faible viscosité du fluide utilisé (eau).

.../...



COMPARAISON DES TAUX DE RETENTION NON  
CAPILLAIRES EXPERIMENTAUX ET THEORIQUES



2.1.4.3- Détermination de la rétention totale

2.1.4.3.1 - Utilisation de la rétention capillaire et non capillaire

Le taux de rétention total est défini comme la somme des taux de rétention capillaire et non capillaire vus précédemment.

$$\beta_{t_{exp}} = \beta_{c_{exp}} + \beta_{nc_{exp}} \quad (72)$$

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

| $G$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )<br>$L$ (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 0     | 0,09  | 0,26  | 0,32  | 0,43  | 0,50  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2,08   | 9,99  | 9,92  | 9,95  | 9,90  | 10,46 | 11,11 |
| 2,61   | 11,34 | 10,99 | 11,04 | 11,46 | 11,39 | 13,20 |
| 3,35   | 12,57 | 12,20 | 12,27 | 12,73 | 12,85 | 15,52 |
| 4,17   | 13,39 | 13,39 | 13,78 | 13,59 | 14,13 | 16,41 |
| 5,05   | 14,87 | 14,76 | 14,52 | 14,71 | 15,64 | 18,89 |
| 5,82   | 15,82 | 15,34 | 15,64 | 15,71 | 16,80 | 21,63 |
| 6,69   | 17,08 | 16,89 | 16,80 | 17,85 | 19,01 | /     |

Tableau ( 21 ) - Taux de rétention total

2.1.4.3.2- Comparaison avec les résultats de la littérature

Nous avons procédé de la façon suivante :

Pour  $G = 0$

$$\beta_{t_{calculé}} = \beta_{c_{(EOTVOS)}} + \beta_{nc_{(Otake -Okada)}} \quad (73)$$

Pour  $G \neq 0$

$$\beta_{t_{calculé}} = \beta_{c_{(EOTVOS)}} + \beta_{nc_{(Tichy)}} \quad (74)$$

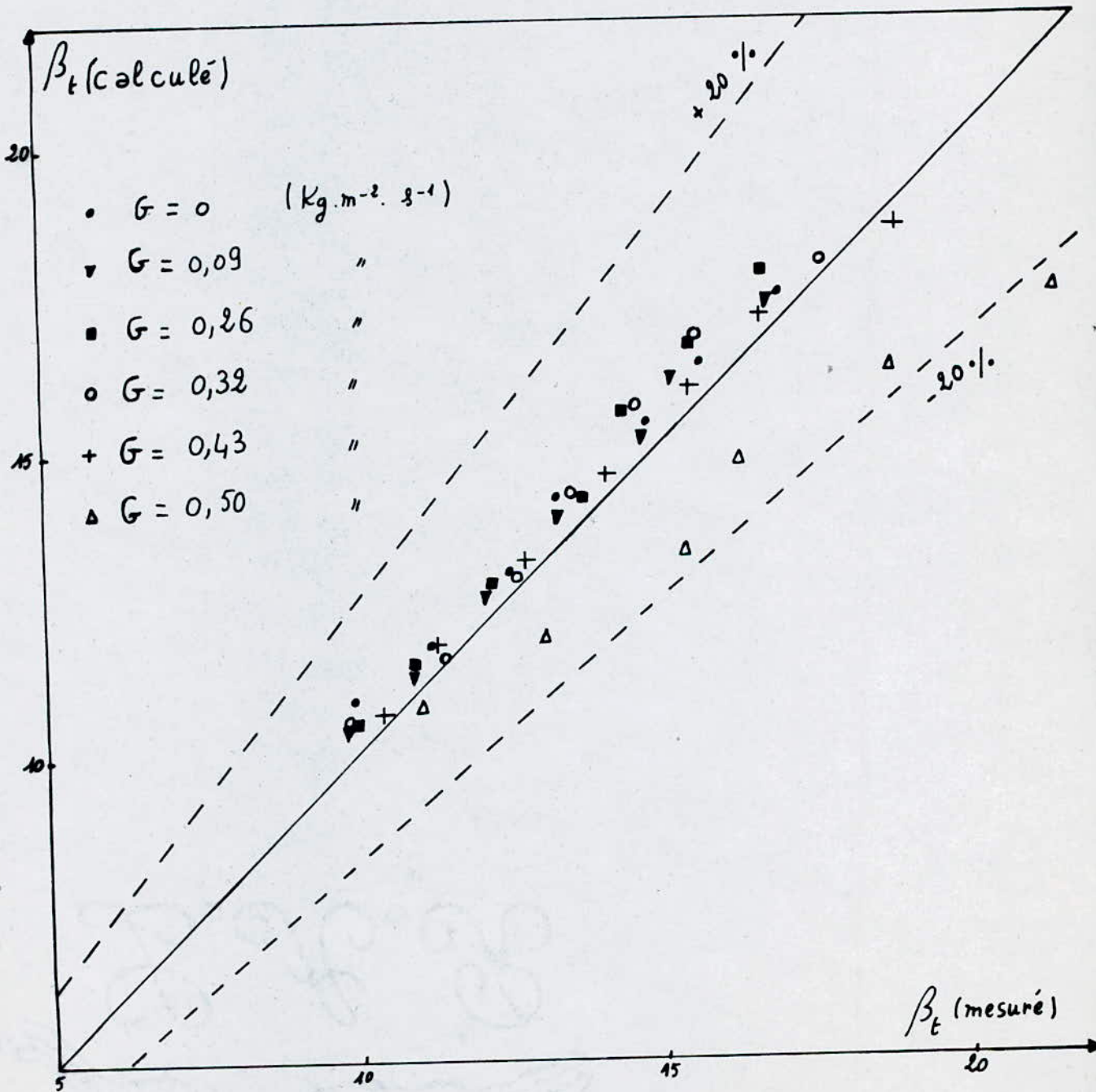
.../...



FIG\_1E3

COMPARAISON DES TAUX DE RETENTION  
EXPERIMENTAUX ET THEORIQUES

Garnissage :  $\varnothing R. 10,5 \text{ mm}$



Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci dessous.

| $G$ (Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )<br>$L$ (Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> ) | 0     | 0,09  | 0,26  | 0,32  | 0,43  | 0,50  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2,08   | 10,94 | 10,36 | 10,53 | 10,60 | 10,73 | 10,82 |
| 2,61   | 11,85 | 11,33 | 11,54 | 11,63 | 11,79 | 11,93 |
| 3,35   | 13,02 | 12,58 | 12,84 | 12,95 | 13,16 | 13,30 |
| 4,17   | 14,22 | 13,86 | 14,18 | 14,31 | 14,57 | 14,75 |
| 5,05   | 15,43 | 15,16 | 15,55 | 15,71 | 16,03 | 16,24 |
| 5,82   | 16,43 | 16,23 | 16,68 | 16,86 | 17,23 | 17,49 |
| 6,69   | 17,51 | 17,39 | 17,91 | 18,12 | 18,55 | 18,85 |

Tableau ( 22 ) - Taux de rétention total calculé.

Sur la fig ( 18 ) nous comparons nos résultats de taux de rétention total ( $\beta_t = \beta_c + \beta_{nc}$ ) à ceux calculés par corrélations. Nous constatons qu'à  $\pm 20$  % près les résultats obtenus sont en bon accord.

#### 2.1.4.3.3- Utilisation de la D.T.S

Nous avons réalisé le montage de la fig ( 19 ).

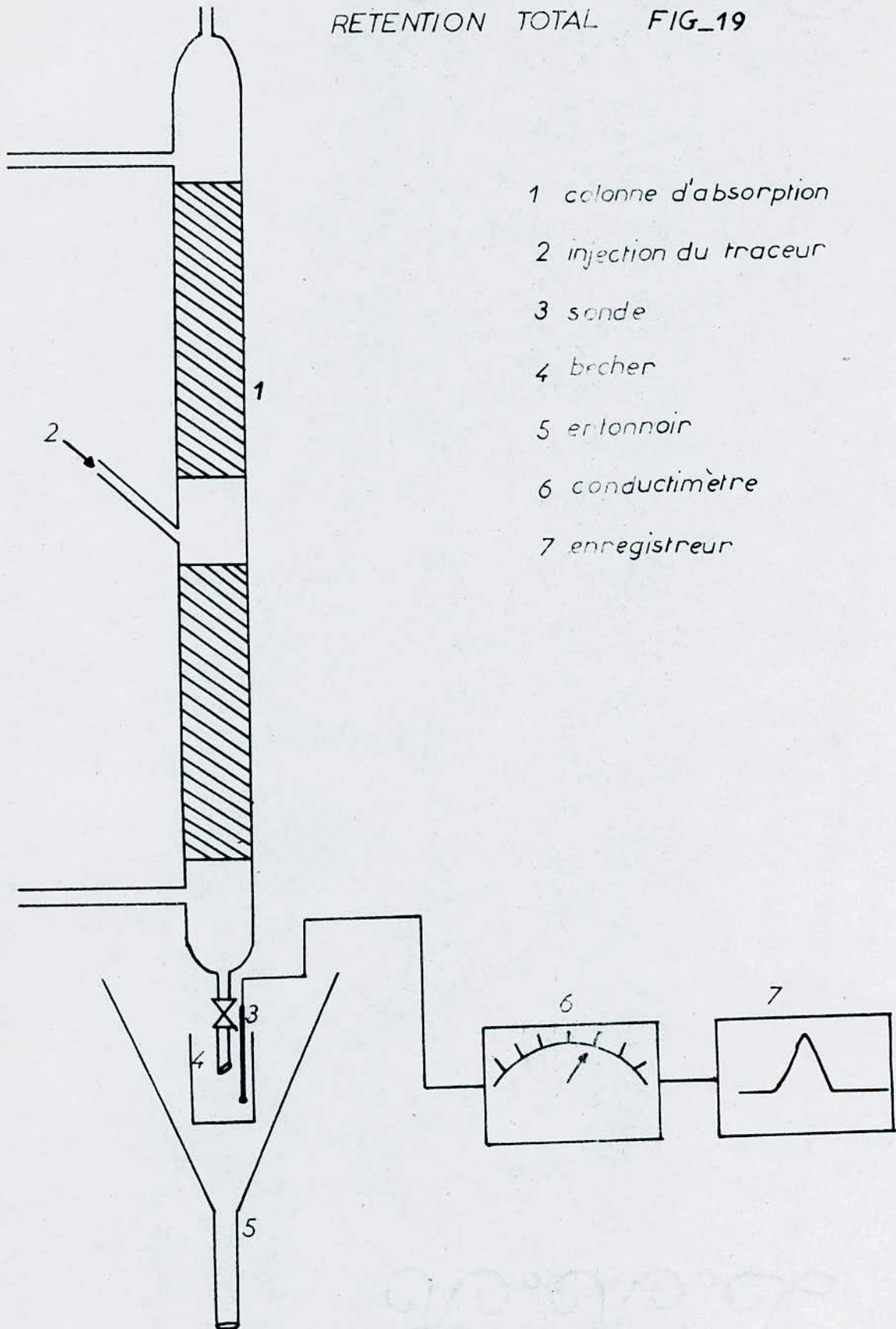
La courbe réponse est enregistrée par un enregistreur servotrace type P.E.D Sefram, relié à un conductimètre Tacussel type C D 6 N.

Nous avons procédé de la façon suivante :

- Faire des essais préalables afin de choisir la sensibilité du conductimètre
- Vérifier la linearité concentration - conductance. Voir Annexe ( 5 )
- Régler le zéro de l'enregistreur qui doit correspondre à l'eau de ville et régler la vitesse de papier.
- Fixer le débit d'eau et attendre que le régime permanent soit établi.



DISPOSITIF POUR MESURER LE TAUX DE  
RETENTION TOTAL FIG\_19



- 1 colonne d'absorption
- 2 injection du traceur
- 3 sonde
- 4 bacher
- 5 entonnoir
- 6 conductimètre
- 7 enregistreur

- Déclancher l'enregistreur.
- Injecter le traceur, le temps d'injection doit être aussi court que possible.
- Arrêter l'enregistreur quand la courbe réponse revient sur la ligne de base ( ou zero).
- Lorsque cela est possible, il est préférable d'injecter et de détecter le traceur dans des zones rétrécies où régnent un fort critère de Reynolds donc une turbulence spontanée assurant la condition de mélange.

\* Exploitation de la courbe reponse

Nous commençons par graduer les axes ; l'axe des abscisses en "temps) en utilisant la valeur de la vitesse de papier qui vaut 25 mm/mn et l'axe des ordonnées en " concentration" en se servant de la courbe d'étalonnage du conductimètre fig (5 - 5).

Pour chaque débit de liquide nous déterminons l'évolution de la concentration du traceur au cours du temps.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau ci dessous :

| L (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 2,08                                | 2,61 | 3,35 | 4,17 | 5,05 | 5,82 | 6,69 |
|--|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| t ( s )                                  | Concentration (Kg.m <sup>-3</sup> ) |      |      |      |      |      |      |
| 0  | 0                                   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 6  | 6,72                                | 7,56 | 6,72 | 8,16 | 7,68 | 8,88 | 9,12 |
| 12                                       | 8,64                                | 8,88 | 8,88 | 9,12 | 9,12 | 9,12 | 9,00 |
| 18                                       | 9,12                                | 9,12 | 8,88 | 8,64 | 8,40 | 8,28 | 8,04 |
| 24                                       | 9,00                                | 8,64 | 8,40 | 7,92 | 7,20 | 6,84 | 6,12 |
| 30                                       | 8,64                                | 8,16 | 7,56 | 6,72 | 6,00 | 5,28 | 4,44 |
| 36                                       | 8,40                                | 7,68 | 6,72 | 5,52 | 4,68 | 4,08 | 3,12 |
| 42                                       | 8,04                                | 6,72 | 6,00 | 4,56 | 3,72 | 2,64 | 1,92 |
| 48                                       | 7,44                                | 5,88 | 5,04 | 3,72 | 2,64 | 1,80 | 1,20 |
| 60                                       | 6,72                                | 4,80 | 3,48 | 2,16 | 1,32 | 0,72 | 0,48 |
| 72                                       | 5,76                                | 3,60 | 2,16 | 1,20 | 0,72 | 0,48 | 0,24 |
| 84                                       | 4,80                                | 2,40 | 1,44 | 0,60 | 0,36 | 0,24 | 0,12 |
| 96                                       | 3,72                                | 1,68 | 0,79 | 0,36 | 0,24 | 0,12 | 0    |



|     |      |      |      |      |      |   |  |
|-----|------|------|------|------|------|---|--|
| I08 | 3,00 | I,08 | 0,48 | 0,24 | 0,12 | 0 |  |
| I20 | 2,40 | 0,72 | 0,36 | 0,12 | 0    |   |  |
| I32 | I,68 | 0,48 | 0,24 | 0    |      |   |  |
| I44 | I,32 | 0,36 | 0,12 |      |      |   |  |
| I56 | I,08 | 0,24 | 0    |      |      |   |  |
| I68 | 0,72 | 0,12 | 0    |      |      |   |  |
| I80 | 0,48 | 0    |      |      |      |   |  |

Tableau (23) :-

Afin de pouvoir tracer les courbes t.C en fonction du temps nous dressons le tableau suivant :

| L (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | 2,08  | 2,61   | 3,35   | 4,17   | 5,05   | 5,82   | 6,69   |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| t (s)                                    | Concentration (Kg.m <sup>-3</sup> ) x temps (s) |        |        |        |        |        |        |
| 0  | 0   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 6  | 40,32   | 45,36  | 40,32  | 48,96  | 46,08  | 53,28  | 54,72  |
| 12                                       | 103,68  | 106,56 | 106,56 | 109,44 | 109,44 | 109,44 | 108,00 |
| 18                                       | 164,16  | 164,16 | 159,84 | 155,52 | 151,20 | 149,04 | 144,72 |
| 24                                       | 216,00  | 207,36 | 201,60 | 190,08 | 172,80 | 164,16 | 146,88 |
| 30                                       | 259,20  | 244,80 | 226,80 | 201,60 | 180,00 | 158,40 | 133,20 |
| 36                                       | 302,40  | 276,48 | 241,92 | 198,72 | 168,48 | 146,88 | 112,32 |
| 42                                       | 337,68  | 282,24 | 252,00 | 191,52 | 156,24 | 110,88 | 80,64  |
| 48                                       | 357,12  | 282,24 | 241,92 | 178,56 | 126,72 | 86,40  | 57,60  |
| 60                                       | 403,20  | 288,00 | 208,80 | 129,60 | 79,20  | 43,20  | 28,80  |
| 72                                       | 414,72  | 259,20 | 155,52 | 86,40  | 51,84  | 34,56  | 17,28  |
| 84                                       | 403,20  | 201,60 | 120,96 | 50,40  | 30,24  | 20,16  | 10,08  |
| 96                                       | 357,12  | 161,28 | 75,84  | 34,56  | 23,04  | 11,52  | 0      |
| I08                                      | 324,00  | 116,64 | 51,84  | 25,92  | 12,96  | 0      |        |
| I20                                      | 288,00  | 86,40  | 43,20  | 14,40  | 0      |        |        |
| I32                                      | 221,76  | 63,36  | 31,68  | 0      |        |        |        |
| I44                                      | 190,08  | 51,84  | 17,28  |        |        |        |        |

|     |        |       |   |  |  |  |
|-----|--------|-------|---|--|--|--|
| I56 | I68,48 | 37,44 | 0 |  |  |  |
| I68 | I20,96 | 20,16 |   |  |  |  |
| I80 | 86,40  | 0     |   |  |  |  |

Tableau ( 24 ) -

Nous déterminons ensuite  $\int_0^{\infty} C dt$  et  $\int_0^{\infty} t.C dt$  par la méthode de pesée.

Le temps de séjour moyen est donné par :

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t.C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad ( 75 )$$

Nous pouvons ainsi accéder à la rétention totale connaissant la porosité  $\epsilon = 73 \%$  et la hauteur garnie utilisée  $Z = 0,65 m$

$$\beta_t = \frac{L \cdot \bar{t}}{\epsilon \cdot \rho_L \cdot Z} \quad ( 23 )$$

Nous donnons dans le tableau ci-dessous les résultats relatifs à cette méthode.

| L (Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $\int_0^{\infty} C \cdot dt$ (cm <sup>2</sup> ) | $\int_0^{\infty} t \cdot C \cdot dt$ (cm <sup>2</sup> ) | $\bar{t}$ (s) | $\beta_t$ % |
|--|---|---|---------------|-------------|
| 2,08                                     | I4,75   | 36,29   | 2,46          | I,08        |
| 2,6I                                     | I0,I9   | I8,82   | I,85          | I,02        |
| 3,35                                     | 7,94  | I3,46   | I,69          | I,I9        |
| 4,I7                                     | 7,53  | 9,00  | I,I9          | I,05        |
| 5,05                                     | 6,46  | 7,08  | I,I0          | I,I7        |
| 5,82                                     | 5,97  | 5,67  | 0,95          | I,I7        |
| 6,69                                     | 5,46  | 4,54  | 0,83          | I,I7        |

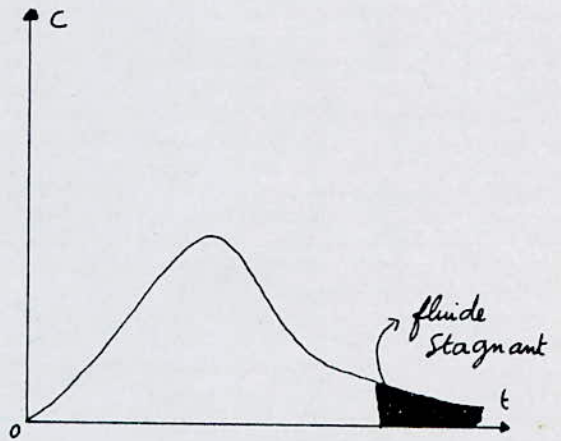
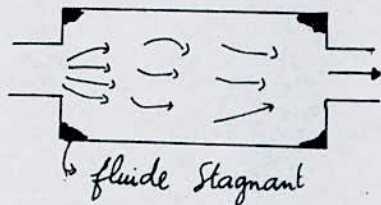
Tableau ( 25 ) - Résultats donnés par la méthode de la D.T.S.



Les résultats de cette méthode présentent un grand écart par rapport à ceux donnés par la méthode de collection de liquide. A notre avis, ceci est dû à la façon d'injection le traceur qu'il faut étudier de près.

Pour le garnissage mouillé, lorsque le débit de liquide augmente, nous constatons que les courbes présentent initialement une grande dissymétrie que nous désignons par phénomène de "queue" puis elle deviennent de plus en plus symétriques et tendent vers une courbe limite indépendante du débit de liquide.

La présence des "queues" de distribution laisse prévoir dans la colonne l'existence de zones relativement stagnantes qui sont le siège d'échanges de traceur avec les zones en écoulement.



2.2- Détermination de l'aire interfaciale .

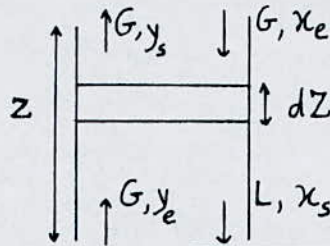
2.2.I- Principe de détermination

La colonne à garnissage fonctionnant à contre courant à l'état arrosé est considérée comme un réacteur piston ouvert et isotherme fonctionnant en régime permanent ; le garnissage est le siège d'une absorption avec réaction chimique de pseudo premier ordre s'effectuant en présence d'une résistance négligeable en phase gazeuse.

La concentration  $C_{B_0}$  en hydroxyde de sodium, et la composition  $y_e$  en dioxyde de carbone à l'entrée de la colonne sont choisies de manière à satisfaire les conditions de régime de réaction rapide de pseudo premier ordre.

Dans un élément différentiel de couche garnie de hauteur  $dZ$ . le bilan de matière en soluté s'écrit :

flux sortant - flux entrant = Débit de réaction chimique



$$G_M dY = H_a \cdot k_L \cdot a C_{Ai} dZ = a \cdot C_{Ai} \sqrt{k_2 \cdot D_{AL} \cdot C_{B_0}} \cdot dZ \quad (76)$$

D'après l'équation ( 24 )  $C_{Ai} = \frac{P_{Ai}}{H_e} = -\frac{P}{H_e} \frac{Y}{I}$  ( 77 )

et comme  $y = -\frac{Y}{I + Y}$

L'équation ( 77 ) devient :  $C_{Ai} = -\frac{P}{H_e} - \frac{Y}{I + Y}$  ( 78 )

Après substitution de ( 78 ) dans l'expression ( 76 ) elle devient:



$$G_M \left( 1 + \frac{1}{Y} \right) dY = \frac{P \cdot a}{H_e} \sqrt{k_2 \cdot D_{AL} \cdot C_{B_\infty}} dz \quad (79)$$

L'intégration de l'expression ( 79 ) entre les deux extrémités du garnissage donne:

$$a = \frac{H_e \cdot G_M}{P \cdot Z \sqrt{k_2 \cdot C_{B_\infty} \cdot D_{AL}}} \left( Y_e - Y_s + L_n \frac{Y_e}{Y_s} \right) \quad (80)$$

Connaissant les compositions de la phase gazeuse à l'entrée et à la sortie de la colonne, le débit molaire spécifique de gaz traversant la colonne, la hauteur garnie, la pression opératoire et les grandeurs physico chimiques relatives au système utilisé, il est possible de déduire la valeur de l'aire interfaciale.

### 2.2.2- Choix des conditions opératoires

Nous avons fixé la composition en dioxyde de carbone à  $y_e = 10\%$  et nous avons travaillé avec une concentration minimale, pour des raisons économiques, qui vérifie le régime réactionnel voulu à savoir :  $C_{B_0} = 0,6 \text{ Kmole. m}^{-3}$ .

\* Estimation de la résistance en phase gazeuse.

En régime rapide de pseudo premier ordre, le flux spécifique d'absorption en présence de résistance au transfert dans les deux phases est :

$$\Psi = \frac{P}{\frac{1}{k_G} + \frac{H_e}{\sqrt{D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_{B_\infty}}}} \quad (81)$$

Considérons les conditions suivantes :

| $C_B \text{ (md. m}^{-3}\text{)}$ | $D_{AL} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ | $k_2 \text{ (m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ | $H_e \text{ (Pa. mol}^{-1} \cdot \text{m}^3\text{)}$ |
|-----------------------------------|---|--|--|
| 600                               | $1,293 \cdot 10^{-9}$                             | 3,837  | 2744   |

Dans les colonnes à garnissage à contre courant  $k_G$  est de l'ordre de :  $k_G \approx 10^{-5} \text{ (mole. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}\text{)}$

La résistance de la phase liquide est :

.../...

$$\frac{H_e}{\sqrt{D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_B}} = \frac{2744}{\sqrt{1,293 \cdot 10^{-9} \times 3,837 \times 600}} = 15,90 \cdot 10^5 \text{ (mol}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$$

La résistance de la phase gazeuse est donc négligeable devant celle de la phase liquide, puisque la résistance relative de la phase gazeuse par rapport à la résistance totale est de l'ordre de 6 % .

\* Vérification des conditions de régime réactionnel rapide de pseudo premier ordre.

Rappelons que les conditions rigoureuses de ce régime sont respectivement

$$H_a \ll E_i$$

$$H_a \gg I$$

$$E = H_a$$

D'un point de vue pratique, la réaction est considérée de pseudo premier ordre à mieux de 10 % près pour  $H_a < 0,5$ .  $E_i$  de même la réaction est supposée rapide dès que  $H_a > 3$

Considérons les conditions suivantes :

| $C_B$ (mol.m <sup>-3</sup> ) | $D_{AL}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $H_e$ (Pa.mol <sup>-1</sup> .m <sup>3</sup> ) | $D_{BL}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $k_2$ (m <sup>3</sup> .mol <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) | $P_A$ (atm) | $\beta$ |
|------------------------------|---|---|---|---|-------------|---------|
| 600                          | $1,293 \cdot 10^{-9}$                       | 2744  | $1,554 \cdot 10^{-9}$                       | 3,837   | 0,1         | 2       |

Calculons le facteur d'accélération instantané

$$E_i \approx \frac{D_{BL} \cdot C_B}{z \cdot D_{AL} \cdot C_{A1}} \quad (82)$$

avec  $C_{A1} = \frac{P_A}{H_e}$

$$E_i \approx \frac{1,554 \cdot 10^{-9} \times 600 \times 2744}{2 \times 1,293 \cdot 10^{-9} \times 10132,739} = 97,64$$

Calculons le nombre de Hatta

$$H_a = \frac{\sqrt{D_{AL} \cdot k_2 \cdot C_B}}{k_L} \approx \frac{\sqrt{1,293 \cdot 10^{-9} \times 3,837 \times 600}}{k_L} \approx \frac{1,725 \cdot 10^{-3}}{k_L}$$

.../...



Dans les colonnes à garnissage l'ordre de grandeur de la conductance partielle de transfert dans la phase liquide est telque

$$4 \cdot 10^{-5} < k_L < 15 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m. s}^{-1})$$

Nous déduisons le domaine de variation du nombre de Hatta soit :

$$11 < H_a < 43$$

Les conditions de régime rapide de pseudo premier ordre sont donc pratiquement satisfaites.

### 2.2.3- Mode opératoire

Pour étudier la variation de l'aire interfaciale en fonction du débit de gaz à débit constant de liquide, nous avons adopté le mode opératoire suivant :

- Préparer une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium de concentration  $C_B = 6$  (K mole . m<sup>-3</sup>).
- Fixer le débit de liquide, et les débits de CO<sub>2</sub> et d'air pour avoir  $y_e = 10$
- Attendre que le régime permanent soit établi pour prélever à l'aide d'une seringue un échantillon de gaz à la sortie de la colonne
- Injecter dans la chambre d'injection du chromatographe
- Refaire la manipulation plusieurs fois pour s'assurer de la reproductibilité des résultats.

### 2.2.4- Résultats

- La composition de la phase gazeuse en dioxyde de carbone à la sortie de la colonne est donnée par la courbe d'étalonnage fig (3-4) après mesure des aires des pics du chromatogramme par la méthode de pesée.
- Le tableau ( 26 ) donne les valeurs des paramètres physico-chimiques calculées d'après les relations données en annexe . Tableau ( 4 - 2 ).
- La composition de la phase gazeuse en dioxyde de carbone à l'entrée de la colonne est estimée par :

$$y_e = \frac{G_{MCO_2}}{G_{MCO_2} + G_M} \quad ( 83 )$$

La hauteur garnie est  $Z = 0,65$  m

L'équation ( 80 ) nous permet de calculer l'aire interfaciale.

|  |                      |                       |                                   |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
|  |                      |                       | $T_L = 288$ K                     |
| Constante cinétique                      | $K_2$                | 3,837                 | $m^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$ |
| Solubilité dans l'eau du $CO_2$          | $H_{eO}$             | 2240                  | $Pa \cdot mol^{-1} \cdot m^3$     |
| /  | $\frac{H_e}{H_{eO}}$ | I; 225                | /                                 |
| Constante de Henry                       | $H_e$                | 2744                  | $Pa \cdot mol^{-1} \cdot m^3$     |
| Diffusivité du gaz A dans le liquide     | $D_{AL}$             | $1,293 \cdot 10^{-9}$ | $m^2 \cdot s^{-1}$                |
| Diffusivité du reactif B dans le liquide | $D_{BL}$             | $1,554 \cdot 10^{-9}$ | $m^2 \cdot s^{-1}$                |
| Viscosité du liquide                     | $L$                  | $1,270 \cdot 10^{-3}$ | $Pa \cdot s$                      |

Tableau ( 26 )

|                               |   |        |        |                                 |
|-------------------------------|---|--------|--------|---------------------------------|
| $T = 288$ K<br>$P = 763$ mmHg | $1,67 \text{ Kg} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ |        |        |                                 |
| G                             | 0,213                                       | 0,300  | 0,391  | $Kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  |
| $G_M$                         | 7,345                                       | 10,345 | 13,483 | $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ |
| $G_{MCO_2}$                   | 0,816                                       | 1,149  | 1,498  | $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ |
| $y_e - 10^2$                  | 10  | 10     | 10     | --                              |
| $Y_e - 10^2$                  | 11,11                                       | 11,11  | 11,11  | --                              |
| $y_s - 10^2$                  | 9,9   | 9,5    | 8,9    | --                              |
| $Y_s - 10^2$                  | 10,99                                       | 10,50  | 9,77   | --                              |
| a                             | 2,13  | 15,57  | 46,03  | $m^{-1}$                        |

Tableau ( 27 ) - Résultats expérimentaux de l'étude de l'aire interfaciale en fonction du débit de gaz à  $L = 1,67 \text{ Kg} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ .



| T = 288 K<br>P = 762mmHg         |       | L = 6,64 Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |        |                                      |  |
|----------------------------------|-------|--|--------|--------------------------------------|--|
| G                                | 0,213 | 0,300  | 0,391  | Kg. m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |  |
| G <sub>M</sub>                   | 7,345 | 10,345                                       | 13,483 | mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |  |
| G <sub>MCO<sub>2</sub></sub>     | 0,816 | 1,149  | 1,498  | mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |  |
| y <sub>e</sub> - 10 <sup>2</sup> | 10    | 10   | 10     | --                                   |  |
| Y <sub>e</sub> - 10 <sup>2</sup> | 11,11 | 11,11  | 11,11  | --                                   |  |
| y <sub>s</sub> - 10 <sup>2</sup> | 8,3   | 7,4  | 6,4    | --                                   |  |
| Y <sub>s</sub> - 10 <sup>2</sup> | 9,05  | 7,99   | 6,84   | --                                   |  |
| a                                | 39,93 | 89,91  | 171,39 | m <sup>-1</sup>                      |  |

Tableau ( 28 ) - Résultats expérimentaux de l'étude de l'aire interfaciale en fonction du débit de gaz à  
L = 6,64 Kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>

#### 2.2.5- Discussion des résultats

Les tableaux ( 27 ) et ( 28 ) présentant les résultats de l'étude expérimentale nécessaires pour établir l'évolution de l'aire interfaciale en fonction du débit de gaz, à débit liquide constant.

Nous remarquons sur la fig ( 20 ) une augmentation de l'aire interfaciale en fonction du débit de gaz pour les points de fonctionnement situés au dessus du point de charge. Cette constatation est d'autant plus marquée que le débit de liquide est élevé.

En effet à partir du point de charge le liquide s'accumule dans les pores du garnissage et la rétention non capillaire croit sous l'effet de frottement gazeux et par conséquent le contact gaz liquide est favorisé.

La fig ( 21 ) montre l'influence de la taille du garnissage sur l'aire interfaciale.

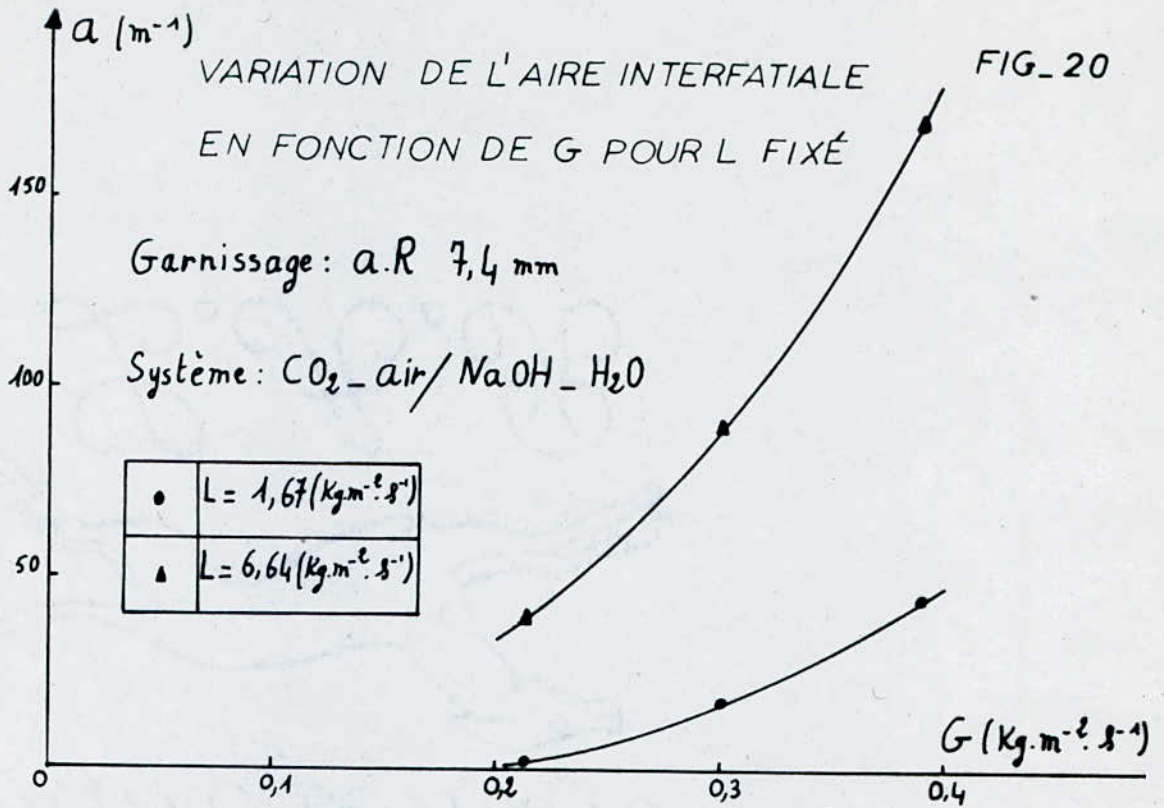
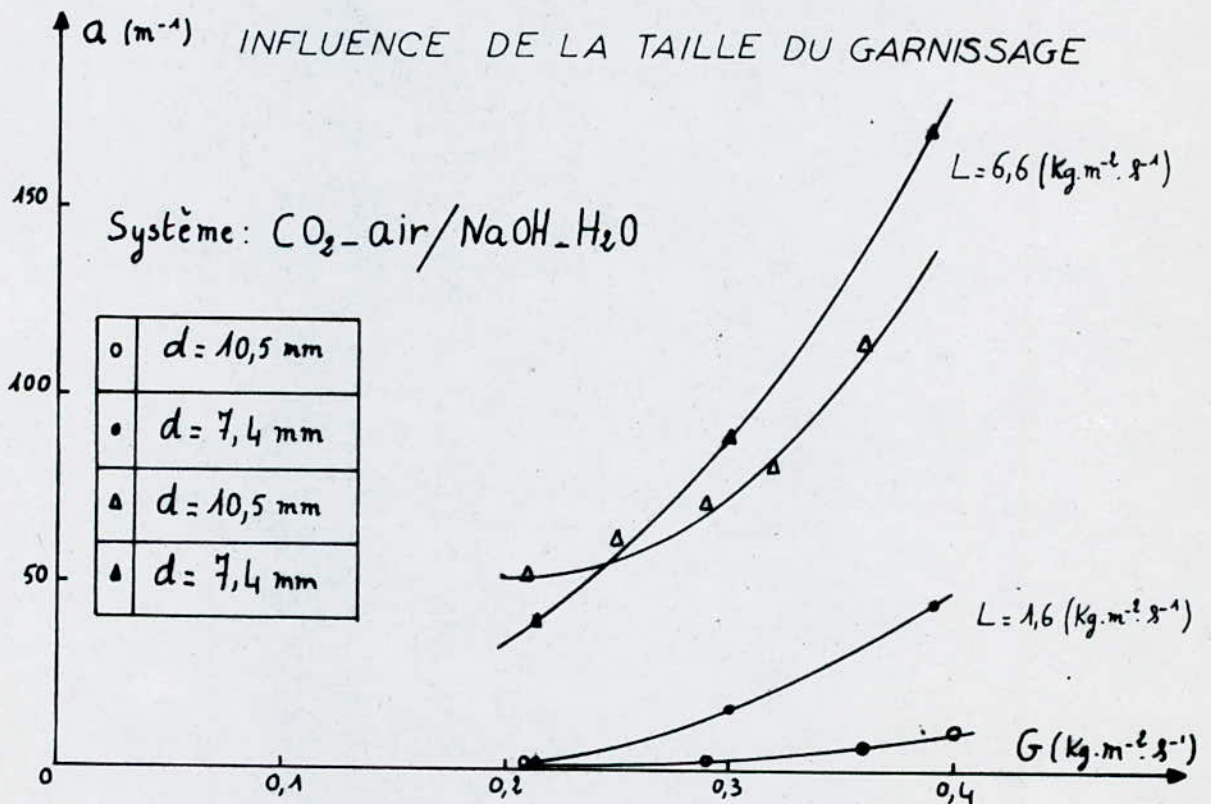


FIG. 21





Lorsque les passages offerts au liquide deviennent plus étroits c'est-à-dire lorsque la dimension du garnissage diminue, la rétention non capillaire augmente aussi le contact gaz-liquide est favorisé ce qui fait augmenter l'aire interfaciale.

2.2.6- Comparaison avec les résultats de la littérature

\* Formule de Onda et Coll [I, 27]

Son expression est ( 84 )

$$\frac{a}{a_c} = 1 - \exp \left[ - 1,45 \left( \frac{L}{a_c \cdot \eta_L} \right)^{0,1} \left( \frac{L^2 \cdot a_c}{\rho_L^2 \cdot g} \right)^{-0,05} \left( \frac{L^2}{\rho_L \cdot \sigma_L \cdot a_c} \right)^{0,2} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{0,75} \right]$$

Le domaine d'application de cette relation est défini par les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} 0,04 &< \frac{L}{a_c \cdot \eta_L} < 500 \\ 2,5 \cdot 10^{-9} &< \frac{a_c \cdot L^2}{\rho_L^2 \cdot g} < 1,8 \cdot 10^{-2} \\ 1,2 \cdot 10^{-8} &< \frac{L^2}{\rho_L \cdot \sigma_L \cdot a_c} < 0,27 \\ 0,3 &< \frac{\sigma_c}{\sigma_L} < 2,0 \end{aligned}$$

L'application de cette relation nécessite la connaissance de la tension superficielle critique  $\sigma_c$  du garnissage.

Pour un garnissage en verre la littérature fournit

$$\sigma_c = 73 \cdot 10^{-3} \text{ N. m}^{-1}$$

$$\text{à } T = 288 \text{ K} \quad \eta_L = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$\text{et} \quad \sigma_L = 53 \cdot 10^{-3} \text{ N. m}^{-1}$$

$$\text{La densité de NaOH étant} \quad \rho_L = 1007 \text{ Kg. m}^{-3}$$

Le tableau suivant donne les résultats obtenus :

.../...

|  |                              |  |   |                             |                 |
|--|------------------------------|--|---|-----------------------------|-----------------|
| $L(\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\frac{L}{a_c \cdot \eta_L}$ | $\frac{a_c \cdot L^2}{g \cdot \rho_L^2}$ | $\frac{L^2}{\rho_L \cdot \sqrt{L} \cdot a_c}$ | $\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{L}}$ | $\frac{a}{a_c}$ |
| 1,67   | 1,87                         | $1,97 \cdot 10^{-4}$                     | $7,45 \cdot 10^{-5}$                          | 1,38                        | 0,36            |
| $a (\text{m}^{-1})$                                    | 252,58                       |  |   |                             |                 |
| $L(\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\frac{L}{a_c \cdot \eta_L}$ | $\frac{a_c \cdot L^2}{g \cdot \rho_L^2}$ | $\frac{L^2}{\rho_L \cdot \sqrt{L} \cdot a_c}$ | $\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{L}}$ | $\frac{a}{a_c}$ |
| 6,64   | 7,45                         | $3,11 \cdot 10^{-3}$                     | $1,18 \cdot 10^{-3}$                          | 1,38                        | 0,54            |
| $a (\text{m}^{-1})$                                    | 378,86                       |  |   |                             |                 |

Tableau ( 29 ) - Application de la corrélation de Onda

La corrélation de Onda donne une valeur de l'aire interfaciale très différente de celles trouvées expérimentalement.

\* Formule de Zech et Mersmann [28]

Son expression est :

$$\frac{a}{a_c} = K \cdot R_e^{1/2} \cdot \left( \frac{W_e}{F_r} \right)^{0,45} \cdot (d \cdot a_c)^{1/2} \quad (85)$$

K étant une constante qui dépend de la forme géométrique du garnissage.

Pour les anneaux Raschig

$$K = 0,0155$$

$$R_e = \frac{L}{\eta_L \cdot a_c} \quad (\text{nb de Reynolds}) \quad (86)$$

$$W_e = \frac{L^2}{\rho_L \cdot d} \quad (\text{nb de Weber}) \quad (87)$$

$$F_r = \frac{L^2}{\rho_L^2 \cdot g \cdot d} \quad (\text{nb de Fronde}) \quad (88)$$



$$\frac{W_e}{F_r} = \frac{\rho_L \cdot g \cdot d^2}{\sigma_L} \quad ( 89 )$$

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci dessous

| L( Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> ) | R <sub>e</sub> | $\frac{W_e}{F_r}$ | d.a <sub>c</sub> | $\frac{a}{a_c}$ |
|--|----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 1,67                                       | 1,87           | 10,21             | 5,19             |                 |
| a ( m <sup>-1</sup> )                      | 96,38          |                   |                  |                 |

| L( Kg. m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> ) | R <sub>e</sub> | $\frac{W_e}{F_r}$ | d.a <sub>c</sub> | $\frac{a}{a_c}$ |
|--|----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 6,64                                       | 7,45           | 10,21             | 5,15             |                 |
| a (m <sup>-1</sup> )                       | 191,63         |                   |                  |                 |

Tableau ( 30 ) - Application de la corrélation de Zech - Mersmann

La corrélation de Zech et Mersmann concorde avec l'expérience à 50 % près.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats essentiels de notre étude peuvent se résumer ainsi

Hydrodynamique.

Après avoir déterminé les caractéristiques du garnissage de diamètre nominal 7,4 mm, nous avons présenté une relation qui permet de calculer la perte de charge subie par un gaz en écoulement forcé à travers le garnissage sec et qui améliore les prévisions des corrélations d'Ergun et de Braner.

$$\frac{P}{Z \cdot U_G} = 8036,27 G + 980,39$$

Nous avons établi un répertoire complet expérimental indiquant l'évaluation de la perte de charge en colonne arrosée en fonction des débits respectifs de gaz et de liquide pour deux systèmes NaOH - H<sub>2</sub>O - air et NaHCO<sub>3</sub> - Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O - air nous avons étudié quatre débits spécifiques de liquide dans le domaine compris entre 2,6l et 6,69 6,69 Kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, et nous avons fait varier progressivement le débit de gaz jusqu'à l'engorgement.

Nous avons ainsi défini les zones de fonctionnement de la colonne:

Zone sous le point de charge est obtenue pour

$$0 < G < 0,15 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

Zone de charge est obtenue pour :

$$0,15 < G < 0,30 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

et pour  $G > 0,30$  la colonne s'engorge.

Nous avons estimé les débits de gaz à l'engorgement par les corrélations de la littérature et c'est le diagramme de labo qui donne des résultats proches des nôtres.

Nous avons ensuite déterminé la rétention de liquide (capillaire, non capillaire et totale) par deux méthodes :

.../...



- Méthode de collection de liquide
  - Méthode de la D.T.S
- et cela pour les deux dimensions d'anneaux Raschig.

La comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature montre que :

- Les résultats du taux de rétention non capillaire obtenus par méthode de collection de liquide, s'accordent avec l'équation d'Otake et Okada à  $\pm 25\%$  près.

Par contre la corrélation de Tichy prévoit des valeurs inférieures aux nôtres.

- La méthode de la D.T.S donnent des valeurs de la rétention totale nettement plus faibles que celles données par la méthode précédente. Il est donc nécessaire de voir de plus près les raisons de cet écart dû entre autres à la façon d'injecter le traceur.

Transfert de matière :

Nous nous sommes intéressés à la détermination par la méthode chimique des aires interfaciales. Le système chimique que nous avons utilisé est  $\text{NaOH} - \text{H}_2\text{O} / \text{CO}_2 - \text{air}$ , avec comme garnissage des anneaux Raschig de 7,4 mm de diamètre nominal.

Ainsi pour  $L = 1,67 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  et  $0,21 < G < 0,39 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

Nous avons trouvé :  $2,13 < a < 46,03 \text{ m}^{-1}$

et pour  $L = 6,64 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  et  $0,21 < G < 0,39 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

Nous avons obtenu :  $39,93 < a < 171,39 \text{ m}^{-1}$

Nous avons déduit après comparaison avec les résultats de [26] qu'une diminution de la taille de garnissage fait augmenter l'aire interfaciale.

## PERSPECTIVES D'AVENIR

### Amélioration de la colonne

- Augmenter l'échelle des débits liquides pour pouvoir étudier des systèmes dans le domaine des fortes interactions gaz-liquide .
- Prévoir un système permettant d'arrêter simultanément l'arrivée des fluides et la récupération de liquide, pour la détermination de la rétention non capillaire.
- Prévoir un système de prélèvement d'échantillons gazeux ainsi que des appareils de mesure en phase gazeuse.
- Prévoir des points d'injection du traceur au sein même du garnissage pour l'étude de la D.T.S.

### Transfert de matière

Il serait intéressant de déterminer les coefficients de transfert de matière en phase liquide  $k_L$  et en phase gazeuse  $k_G$  en utilisant le garnissage de petite dimension, ainsi que la détermination des paramètres de transfert pour des garnissages catalytiques.

Il conviendrait aussi d'étudier les systèmes organiques.



NOMENCLATURE

|             |  |
|-------------|--|
| a           | aire interfaciale  |
| $a_c$       | aire spécifique de couche                                |
| $a_e$       | aire spécifique externe d'un anneau supposé plein        |
| $a_p$       | aire spécifique de particule                             |
| $a_s$       | aire spécifique définie par Reichelt                     |
| a-R         | anneau Raschig   |
|             |  |
| A           | gaz soluté   |
| B           | réactif liquide  |
| C           | Concentration  |
| $C_{Ai}$    | concentration du gaz A dissous à l'interface             |
| $C_A$       | concentration du gaz A dissous au sein du liquide        |
| $C_{Ae}$    | concentration du gaz A dissous en équilibre avec le gaz  |
| $C_B$       | concentration du réactif B au sein du liquide            |
| d           | diamètre nominal d'un anneau Raschig                     |
| $d_e$       | diamètre extérieur d'un anneau Raschig                   |
| $d_i$       | diamètre intérieur d'un anneau Raschig                   |
| D           | diamètre de la colonne                                   |
| $D_{AL}$    | diffusivité du gaz A dans le liquide                     |
| $D_{BL}$    | diffusivité du réactif B dans le liquide                 |
| e           | épaisseur de l'anneau Raschig                            |
| E           | facteur d'accélération                                   |
| $E_i$       | facteur d'accélération instantané                        |
| g           | accélération de la pesanteur                             |
| G           | débit massique spécifique du gaz inerte                  |
| $G_{CO_2}$  | débit massique spécifique du gaz $CO_2$                  |
| $G_M$       | débit molaire spécifique du gaz inerte.                  |
| $G_{MCO_2}$ | débit molaire spécifique du gaz $CO_2$                   |
| $G_V$       | débit volumique de gaz inerte                            |
| $G_E$       | débit massique spécifique de gaz à l'engorgement         |
| h           | hauteur de l'anneau Raschig                              |
| $H_a$       | nombre de Hatta  |
| $H_e$       | constante de Henry                                       |
| $k_L$       | conductance partielle de transfert dans la phase liquide |
| $k_G$       | conductance partielle de transfert dans la phase gazeuse |

.../...

|              |  |
|--------------|--|
| $K_L$        | conductance globale de transfert en phase liquide                      |
| $K_G$        | conductance globale de transfert en phase gazeuse                      |
| $k_{m,n}$    | constante de la vitesse de réaction d'ordre m et n                     |
| $L$          | débit massique spécifique de liquide                                   |
| $L_V$        | débit volumique de liquide   |
| $N$          | nombre d'anneaux par unité de volume garni                             |
| $P$          | pression totale  |
| $P_A$        | pression partielle du gaz A au sein de la phase gazeuse                |
| $P_{Ai}$     | pression partielle du gaz A à l'interface                              |
| $r$          | vitesse de réaction  |
| $S$          | vitesse de renouvellement des éléments de liquide situés à l'interface |
| $t$          | temps  |
| $T$          | temperature  |
| $U_G$        | vitesse de gaz   |
| $V$          | volume total de la colonne   |
| $V_L$        | volume de liquide retenu dans le garnissage                            |
| $y_e$        | fraction molaire du gaz A à l'entrée du réacteur                       |
| $Y_e$        | fraction molaire du gaz A à la sortie du réacteur                      |
| $Y_s$        | fraction molaire du gaz A dans l'inerte à la sortie du réacteur        |
| $Z$          | hauteur garnie   |
| $z$          | coefficient stoechiométrique du réactif B                              |
| $\beta_t$    | taux de rétention total  |
| $\beta_c$    | taux de rétention capillaire   |
| $\beta_{nc}$ | taux de rétention non capillaire                                       |
| $\beta_e$    | taux de rétention non capillaire extrapolé à débit de gaz nul          |
| $\beta_{ge}$ | taux de rétention non capillaire au débit de gaz à l'engorgement       |
| $\beta_o$    | taux de rétention non capillaire mesuré à débit de gaz nul             |
| $\epsilon$   | porosité du garnissage   |
| $\epsilon$   | porosité interne d'un anneau   |
| $\rho$       | densité du liquide   |
| $\rho$       | densité du gaz   |
| $\eta$       | viscosité dynamique  |
| $\sigma$     | tension superficielle  |
| $\delta_L$   | épaisseur du film liquide  |

.../...



- $\delta_g$  épaisseur du film gazeux
- $\bar{J}$  flux total de transfert de matière
- $\psi$  flux spécifique de transfert de matière
- $\tau$  temps de séjour.

Annexe I / - Détermination des caractéristiques du garnissage

I.1- Garnissage : a . R 10,5 mm

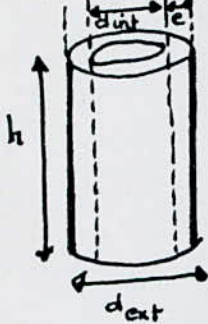
Voir [26]

I.2- Garnissage : a . R 7,4 mm

I.2.1- Dimensions du garnissage

Nous prenons un échantillon de 100 éléments du garnissage et nous mesurons les diamètres extérieur et intérieur ainsi que la hauteur de chaque a.R.

Nous admettons que :



$$d_{ext} = \sum_{i=1}^{100} \frac{d_{i\ ext}}{100}$$

$$d_{int} = \sum_{i=1}^{100} \frac{d_{i\ int}}{100}$$

$$h = \sum_{i=1}^{100} \frac{h_i}{100}$$

L'épaisseur de l'a.R est donnée par :

$$e = \frac{d_{ext} - d_{int}}{2}$$

I.2.2- Détermination de la porosité

Nous remplissons d'a.R une éprouvette de 1l et nous pesons cette éprouvette :  $m_1$

Nous remplissons ensuite cette même éprouvette d'eau jusqu'à ce que celle-ci couvre entièrement les a.R et nous la pesons de nouveau :  $m_2$

Calcul :

La masse d'eau occupant le volume des vides dans l'éprouvette est

$$m = m_2 - m_1$$

Le volume de cette eau est :

$$V = \frac{m}{\rho}$$

.../...



La porosité est alors donnée par :  $\varepsilon = \frac{V}{V_t}$

avec  $V_t$  le volume total du garnissage dans l'éprouvette

I.2.3- Détermination de  $a_p$  et  $a_c$

$$a_p = \frac{A_p}{V_p}$$

\*  $A_p$  = surface totale de l'a.R offerte à l'écoulement

$V_p$  = Volume de l'a.R

$$A_p = 2 \left( \pi \cdot \frac{d_{ext}^2}{4} - \pi \cdot \frac{d_{int}^2}{4} \right) + \pi \cdot d_{ext} \cdot h + \pi \cdot d_{int} \cdot h$$

$$A_p = \frac{\pi}{2} (d_{ext}^2 - d_{int}^2) + \pi \cdot h (d_{ext} + d_{int})$$

$$A_p = \left[ \frac{\pi}{2} (d_{ext} - d_{int}) + \pi \cdot h \right] [d_{ext} + d_{int}]$$

$$A_p = \pi (e + h) (d_{ext} + d_{int})$$

$$* V_p = \pi \cdot \frac{d_{ext}^2}{4} \cdot h - \pi \cdot \frac{d_{int}^2}{4} \cdot h$$

$$V_p = \frac{\pi}{4} \cdot h (d_{ext}^2 - d_{int}^2)$$

$$V_p = \frac{\pi}{2} \cdot e \cdot h \cdot (d_{ext} + d_{int})$$

d'où  $a_p = \frac{2(e+h)}{e \cdot h}$

$$a_c = a_p (1 - \varepsilon)$$

I.2.4- Détermination de N

N : Nombre de particules par unite de volume garni

$$N = \frac{1 - \varepsilon}{V_p}$$

.../...

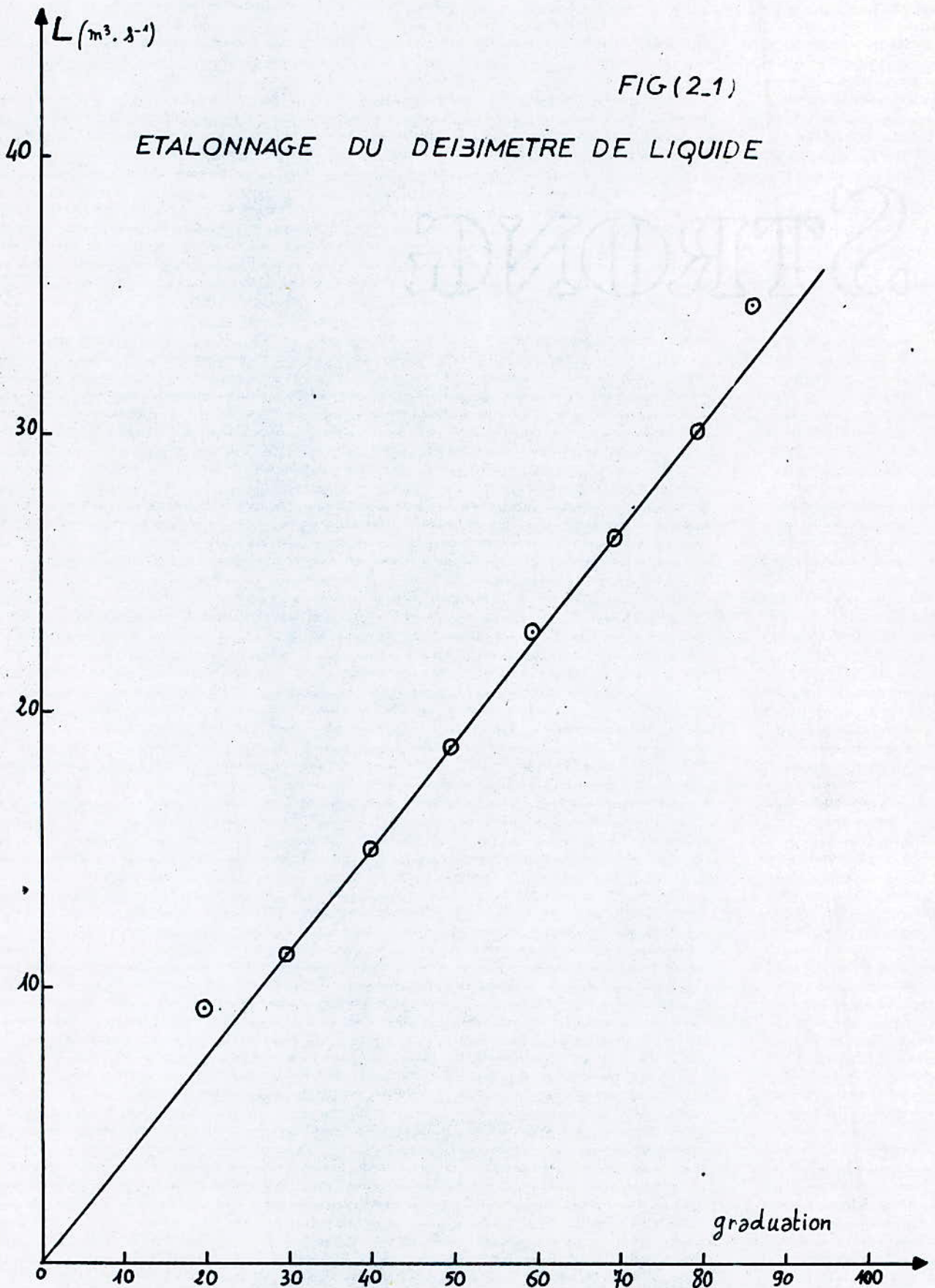
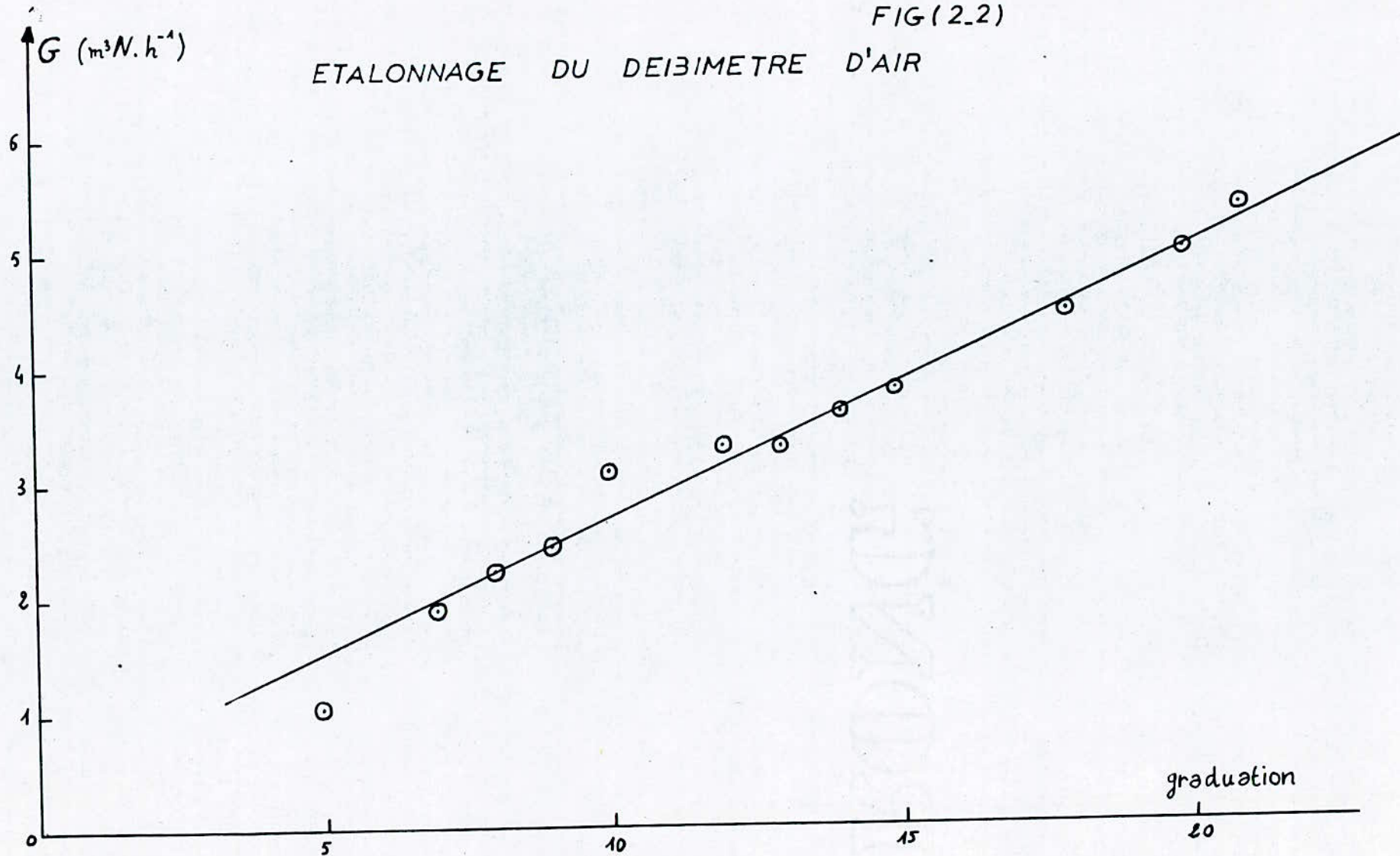


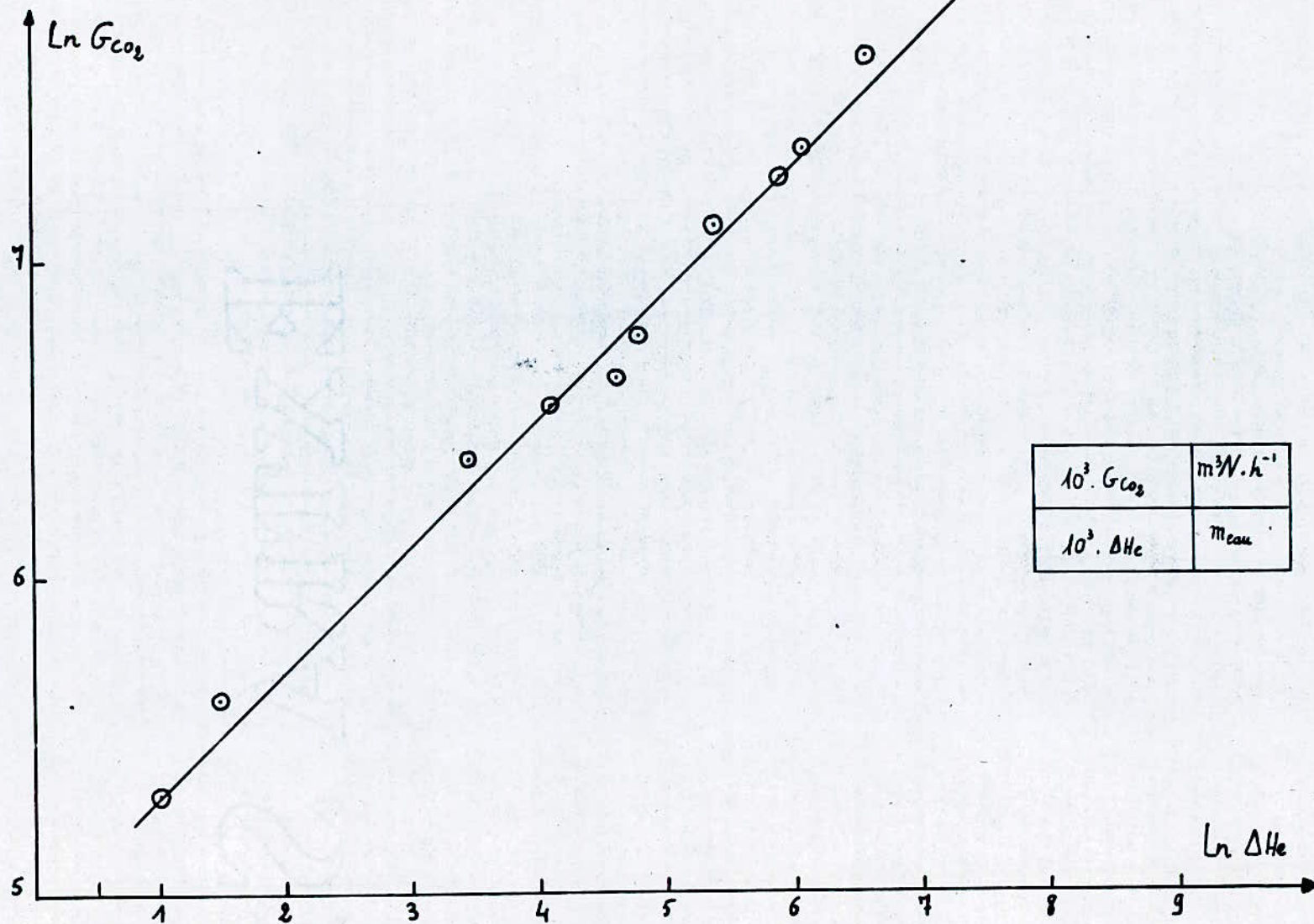


FIG (2.2)

ETALONNAGE DU DEIBIMETRE D'AIR



ETALONNAGE DE L'ORIFICE DE GAZ FIG(2.3)



|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| $10^3 \cdot G_{CO_2}$   | $m^3/V \cdot h^{-1}$ |
| $10^3 \cdot \Delta H_e$ | $m_{eau}$            |



Annexe 2 / - Etalonnage des débitmètres voir [26]

- 2.1 - Etalonnage du débitmètre de liquide fig ( 2-1 )  
2.2 - Etalonnage du débitmètre d'air fig ( 2-2 )  
2.3 - Etalonnage de l'orifice de gaz fig ( 2-3 )

Annexe 3 / - Analyse chromatographique

Chromatographe ————— type HP I8790

Gaz Vecteur ————— nature : H<sub>e</sub>  
pureté : 4,6 (99,996)  
pression d'entrée : 1 bar  
débit : 7,1 ml/min

Colonne ————— type porapak N  
longueur = 1,5 m  
diamètre intérieur = 3mm  
granulométrie : 80 - 100 meshes

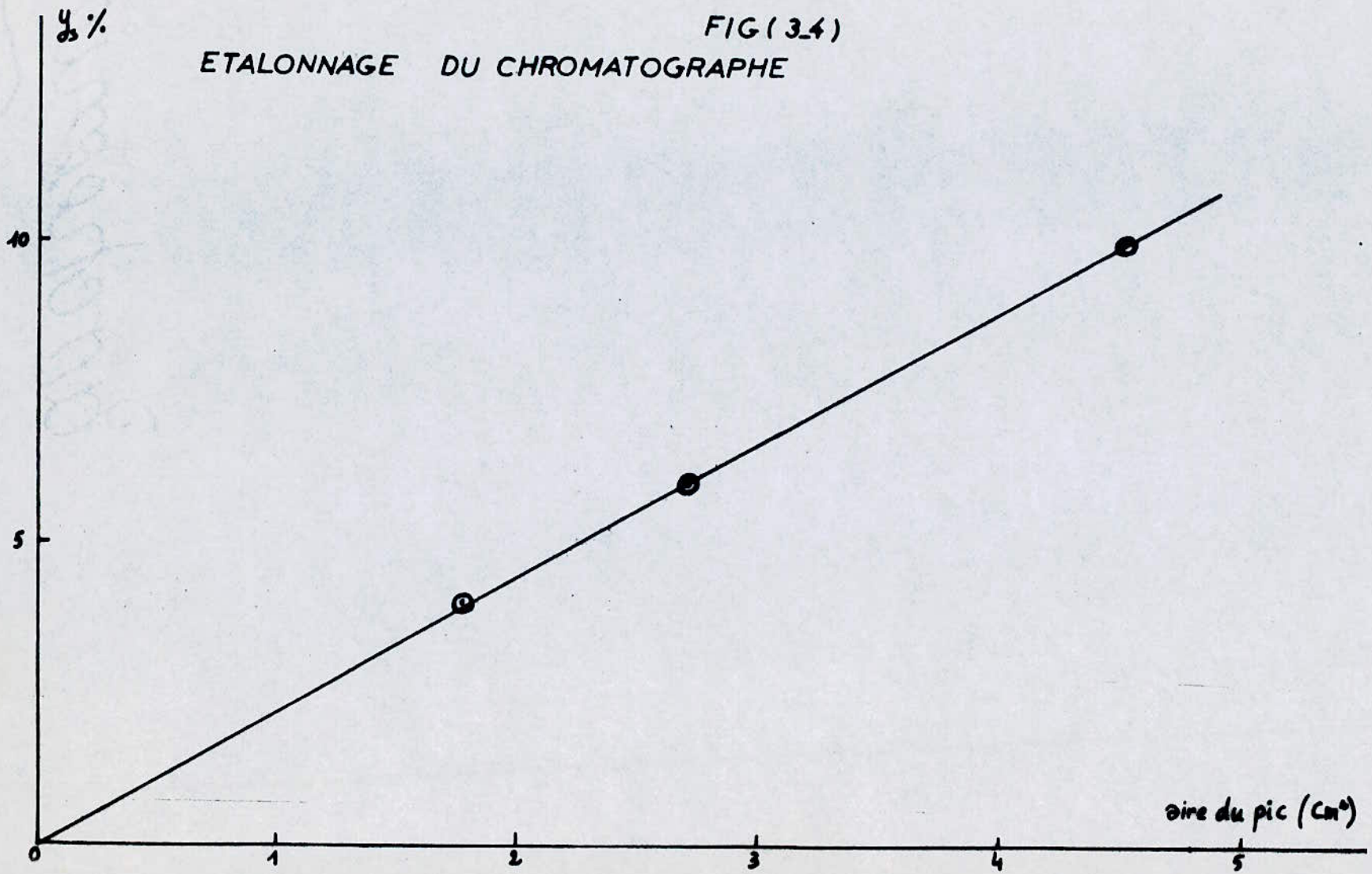
Conditions opératoires ————— Température du four = 50 °C  
Température de la chambre d'injection = 100 °C  
Température du détecteur = 150 °C  
Courant de filament : 2  
Atténuation : 64  
Quantité injectée = 5 ml  
Moyen d'injection : seringue

Etalonnage du chromatographe ————— Nous choisissons G<sub>M</sub> et G<sub>CO<sub>2</sub></sub> de façon à avoir la composition y<sub>e</sub> voulue

fig ( 3-4 )  
Nous prelevons à l'aide d'une seringue un échantillon du mélange gazeux CO<sub>2</sub> - air que nous introduisons dans la chambre d'injection du chromatographe.

Les résultats de cet étalonnage sont regroupés dans le tableau suivant :

.../...



98



| $\gamma_c$ %   | 4      | 6      | 10     |
|--|--------|--------|--------|
| $G_M$ (mole . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )      | 10,345 | 10,345 | 10,345 |
| Position du Flotteur du<br>debrimètre d'air            | 15     | 15     | 15     |
| $G_{CO_2}$ (mole . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> ) | 0,431  | 0,660  | 1,149  |
| $D_{He}$ (mm . H <sub>2</sub> O)                       | 1,4    | 4,1    | 16,4   |
| Aire du pic (cm <sup>2</sup> )                         | 1,77   | 2,70   | 4,50   |

Tableau - (2 - I)

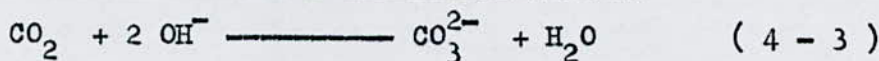
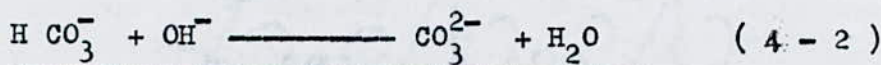
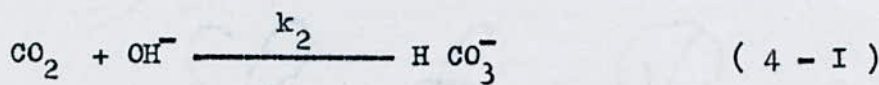
Annexe 4 /- Propriétés physico chimiques et reactions chimiques mises  
en oeuvre pour le système gaz liquide utilisé

4.1 - Propriétés physico chimiques

Les propriétés physico chimiques ont été estimées à l'aide des relations regroupées dans le tableau (4 - 2)

4.2- Reactions chimiques mises en oeuvre pour le système air + CO<sub>2</sub> /  
eau + NaOH

Pour la détermination de l'aire interfaciale nous avons employé la réaction chimique entre CO<sub>2</sub> et NaOH en regime de reaction rapide de pseudo premier ordre



Propriétés physico-chimiques du Système utilisé. TABLEAU (4.2)

| Propriétés<br>Système        | $\log K_2$   | $H_{eo}$  | $\log \frac{H_e}{H_{eo}}$            | $D_{AL}$  | $D_{BL}$                          | $\mu_L$   |
|------------------------------|--|---|--------------------------------------|---|-----------------------------------|---|
|                              | $m^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$                                | $Pa \cdot mol^{-1} \cdot m^3$   |                                      | $m^2 \cdot s^{-1}$  | $m^2 \cdot s^{-1}$                | $Pa \cdot s$  |
| $CO_2$ -air/<br>NaOH- $H_2O$ | $10,4 - 2850 \cdot T_L^{-1} +$<br>$133 \cdot 10^{-6} \cdot [OH]$ | $80 \cdot T_L - 20,8 \cdot 10^3$<br><br>$280 \leq T_L \leq 305 \text{ K}$ | $(377 - 0,8 T_L) [OH] \cdot 10^{-6}$ | $\frac{T_L}{3,28 \cdot 10^{28} \cdot T^{-7} +}$<br>$3,85 \cdot 10^7 [OH]$<br><br>$281 \leq T_L \leq 308 \text{ K}$<br><br>$0 \leq [OH] \leq 1100$<br>$mol \cdot m^{-3}$ | $1,14 \cdot 10^{-34} \cdot T_L^9$ | $1,87 \cdot 10^{14} \cdot T_L^{-7} +$<br>$2,2 \cdot 10^{-7} [OH]$<br><br>$281 \leq T_L \leq 308 \text{ K}$<br><br>$0 \leq [OH] \leq 1100$<br>$mol \cdot m^{-3}$ |

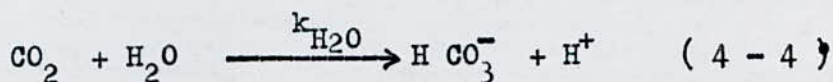
92



La cinétique de la réaction globale est donnée par :

$$r = k_2 \cdot [\text{CO}_2] \cdot [\text{OH}^-]$$

A noter que parallèlement à la réaction ( 4 - I ) la réaction suivante a lieu



Pinsent et coll. ont déterminé les constantes cinétiques des réactions ( 4 - I ) et ( 4 - 4 ) et ont déduit que le rapport des constantes cinétiques des deux réactions étant de l'ordre de

$$\frac{k_2}{k_{\text{H}_2\text{O}}} \approx 400$$

La contribution de la réaction ( 4 - 4 ) au flux d'absorption total de  $\text{CO}_2$  est négligeable.

Annexe 5 /- Vérification de la linéarité concentration conductance

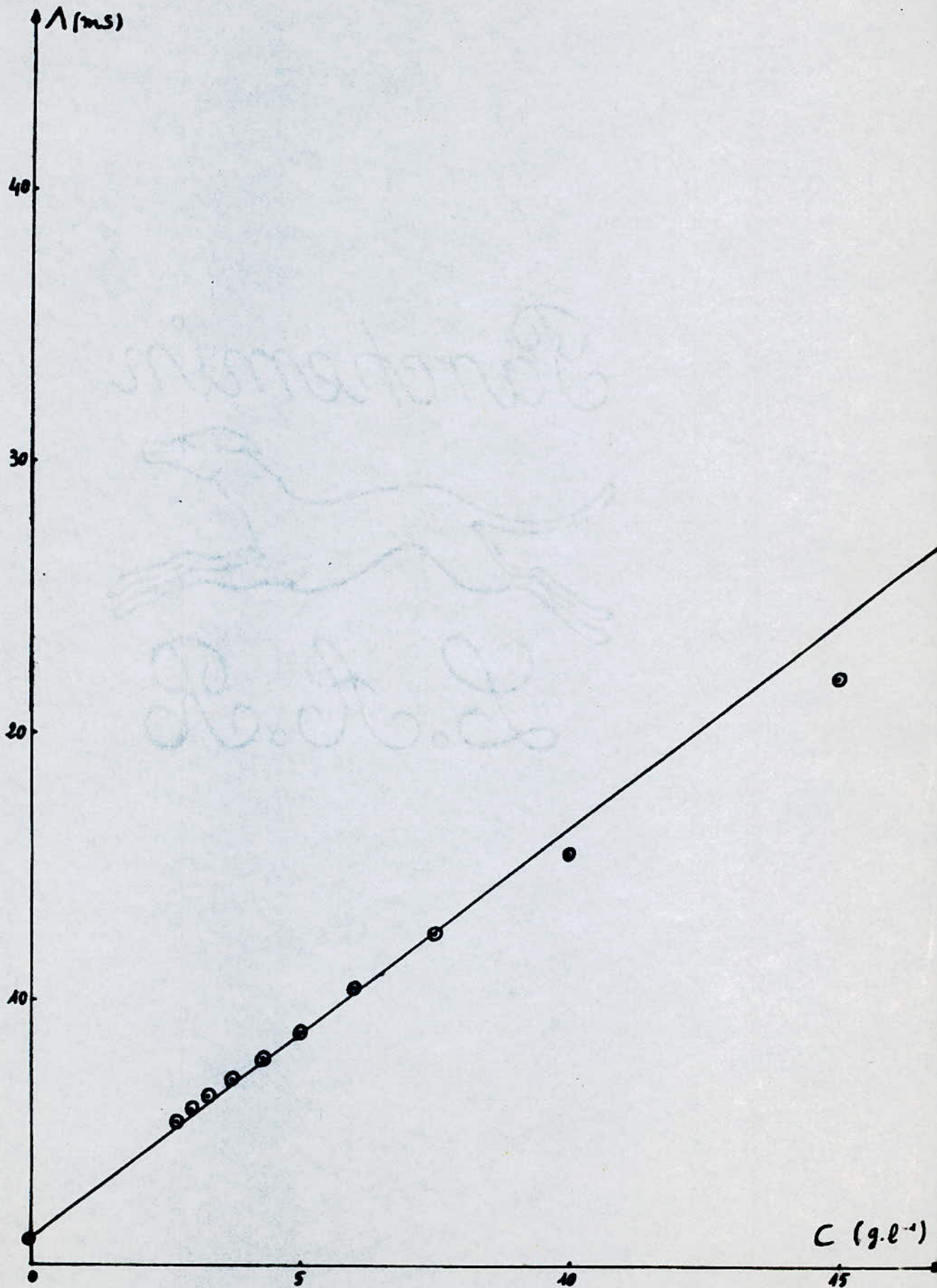
Tableau de mesure ( 5 - 3 )

| C (g. l <sup>-1</sup> ) | Δ (ms) |
|-------------------------|--------|
| 15,00                   | 22,00  |
| 10,00                   | 15,50  |
| 7,50                    | 12,50  |
| 6,00                    | 10,50  |
| 5,00                    | 8,80   |
| 4,28                    | 7,80   |
| 3,75                    | 7,00   |
| 3,33                    | 6,40   |
| 3,00                    | 5,90   |
| 2,73                    | 5,40   |
| 0 (Eau)                 | 1,00   |

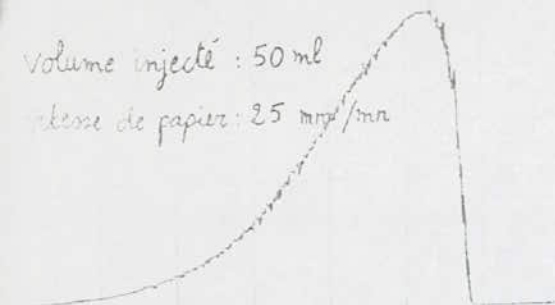
fig: ( 5 - 5 )

FIG (55)

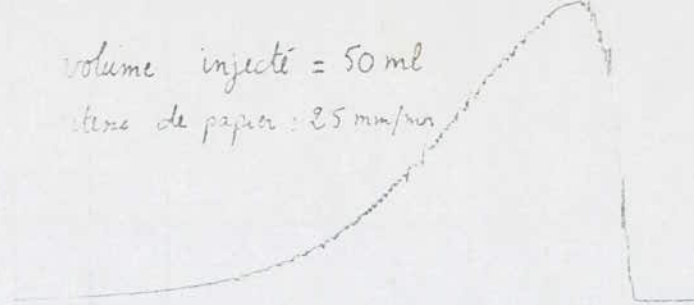
ETALONNAGE DU CONDUCTIMETRE



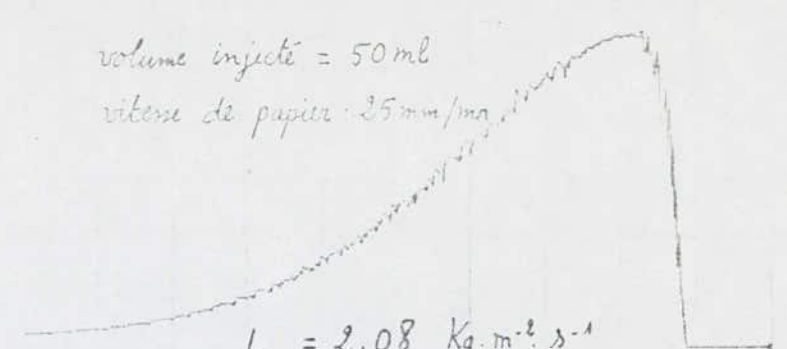




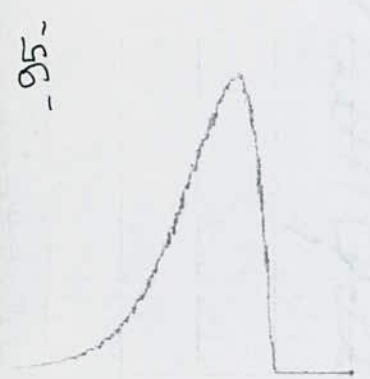
$$L = 3,35 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



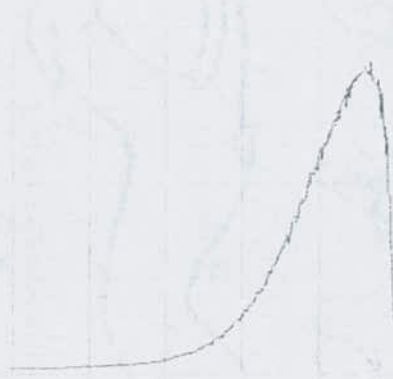
$$L = 2,61 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



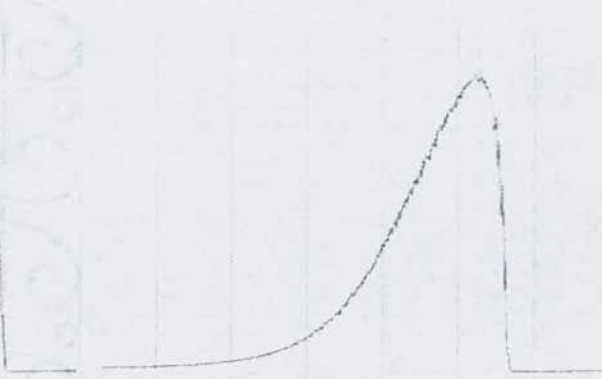
$$L = 2,08 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



$$L = 6,69 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



$$L = 5,82 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



$$L = 5,05 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



$$L = 4,17 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

COURBES  $C = f(t)$  ENREGISTRÉES (METHODE DE D.T.S)

576 ↑ t.C (g.l<sup>-1</sup>)

288

0

120

$$L = 2,61 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

576 ↑ t.C (g.l<sup>-1</sup>)

288

t(s)

240

120

t(s)

$$L = 4,17 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

576 ↑ t.C (g.l<sup>-1</sup>)

288

0

120

$$L = 2,08 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

576 ↑ t.C (g.l<sup>-1</sup>)

288

t(s)

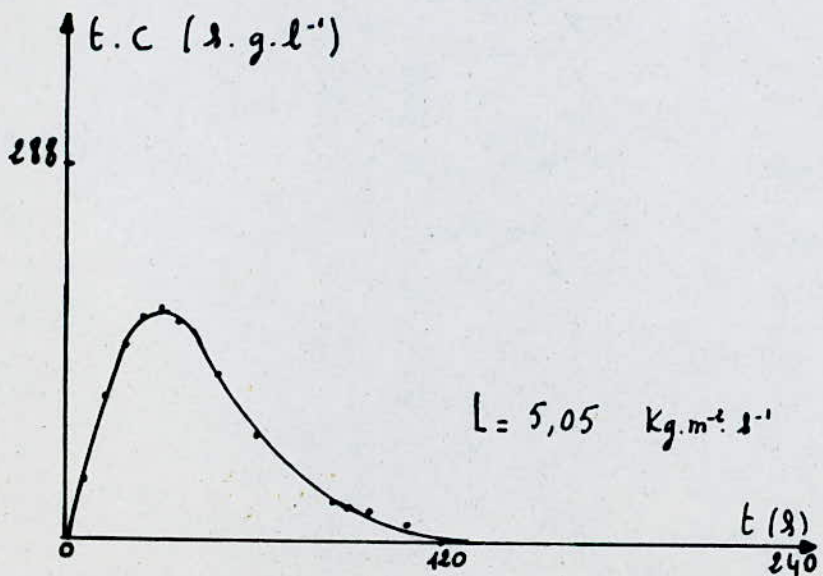
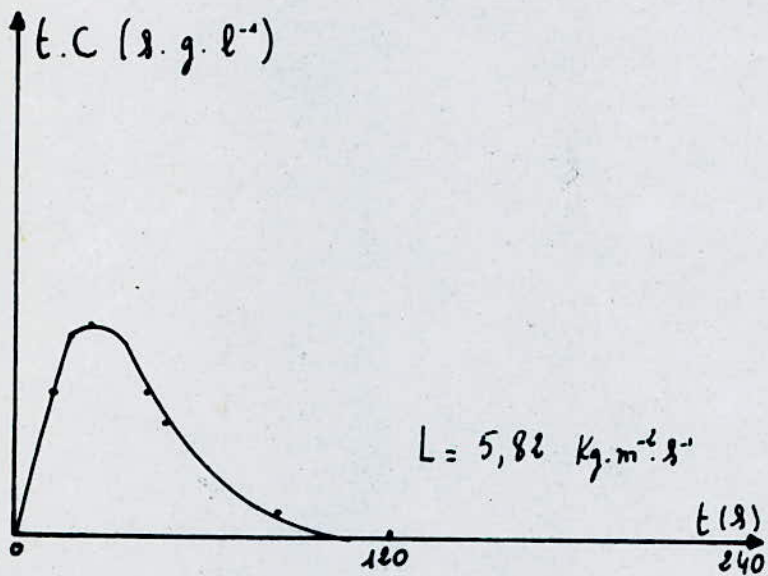
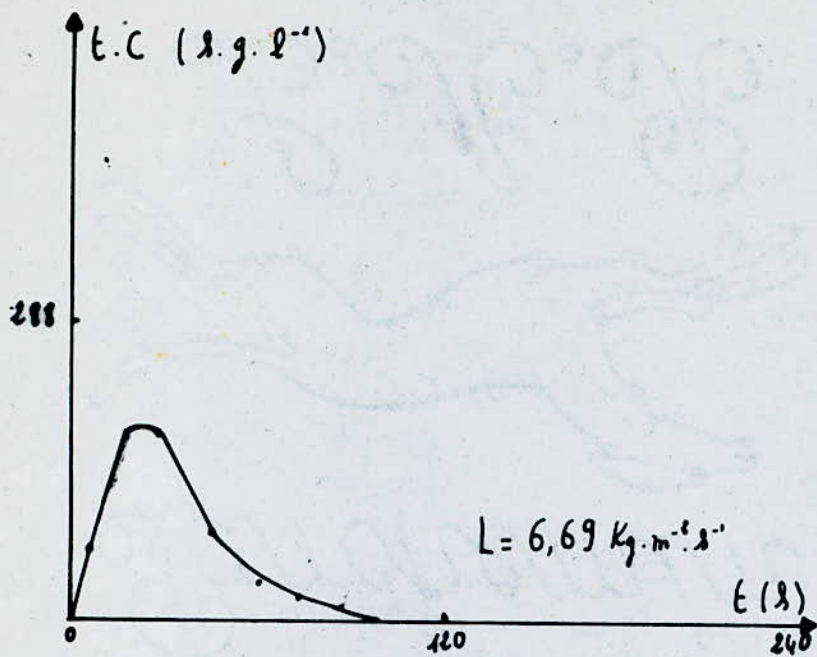
240

120

t(s)

$$L = 3,35 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$





REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Laurent, thèse de doctorat, INPL, Nancy , 1975
- [2] J.C Charpentier, Centre de perfectionnement des industries chimiques, Nancy 1978
- [3] S.Ergun, Chem. Eng. Progr. , 1952, 48, 89
- [4] H.Brauer, Chem. Eng. Techn. , 1957, 29 , 785
- [5] W.Reichelt et E.Blass, Chem, Eng. Techno., 1974,46 , 171
- [6] T.Sherwood,G.Shipley et F.Hollway, Ind.Eng . Chem, 1938,30,765
- [7] F.Zenz, Chem,Eng Prog?, 1947 , 43 ; 415
- [8] W.LOBO, L.Friend, F.Hashmahl et F.Zenz, Trans, A.I. Ch.E., 1945, 41,693
- [9] F.Zenz et R.Lavin, Hydrocarbon Processing; 1965,44,121
- [10] T.Takahashi, Y.Akagi et K.Fujita, J.Chem.Eng.Japon, 1973,6,1,97
- [11] J.C Charpentier, Thèse de Doctorat, INPL, Nancy 1968
- [12] T.Otaké et K.Okada, Kagaka, Kagaka Kagaka, 1953 ,17,176
- [13] C.B.S Varrier et K.R. Rao, Chem, Age India, 1963,14,345
- [14] D.M Mohunta et G.S Laddha, Chem. Eng. Sci, 1965,20,1069
- [15] J.Tichy, Chem.Eng. Sci, 1973, 28, 655
- [16] V.Kolar et Z.Broz, Coll.Czech.Chem. Commun., 1972, 37 , 3551
- [17] J. Villermaux , Génie de la réaction Chimique , Ed Lavoisier., 1982
- [18] D. Hadjidakis , Thèse de Doctorat , INPL,NNancy , 1983
- [19] W . Whitman , Chem and metallurgical. Eng., 1923 , 29 , 146
- [20] Techniques de l'ingénieur , J 2640
- [21] R . Higbie , Trans . Am . Inst Chem . Eng . , 1935 , 35 , 365
- [22] P.V . Danckwerts , Ind . Eng . Chem . , 1951 , 43 , 1460
- [23] D.W . Van Krevelen et P.J. Hoftyizer , 21<sup>eme</sup> Congres Intern. Chem . Ind . , Bruxelles , 1948
- [24] H . Hikita , S ; Asai ; Intern . Chem . Eng . , 1964 , 4 , 5
- [25] J.C. Charpentier, G. Wild , Centre de perfectionnement des industries chimiques , Nancy , 1982
- [26] H . Benaddi , Projet de Fin d'études, Juin 1986
- [27] K . Onda , H. Takenchi et y . Okamoto , J . Chem . Eng . Japon 1968 , 1 , 1 , 56
- [28] JB; Zech , A.B. Mersman , Lig flom and lig phase man tranfer in irrigated packed columns , inst . Chem . Eng , 1979 , 56 , 39
- [29] B.I Morsi, Thèse de doctorat, INPL , Nancy , 1982
- [30] A. L aurent et J.C Charpentier , Chem . Eng . Journal, 1974



