

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

8/87

1ex

وزارة التعليم والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المكتبة — المكتبة  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Etat

### SUJET

# **Etude Hydrodynamique dans un Appareil à Garnissage Mobil**

Proposé par :

M.A. CIESLAK

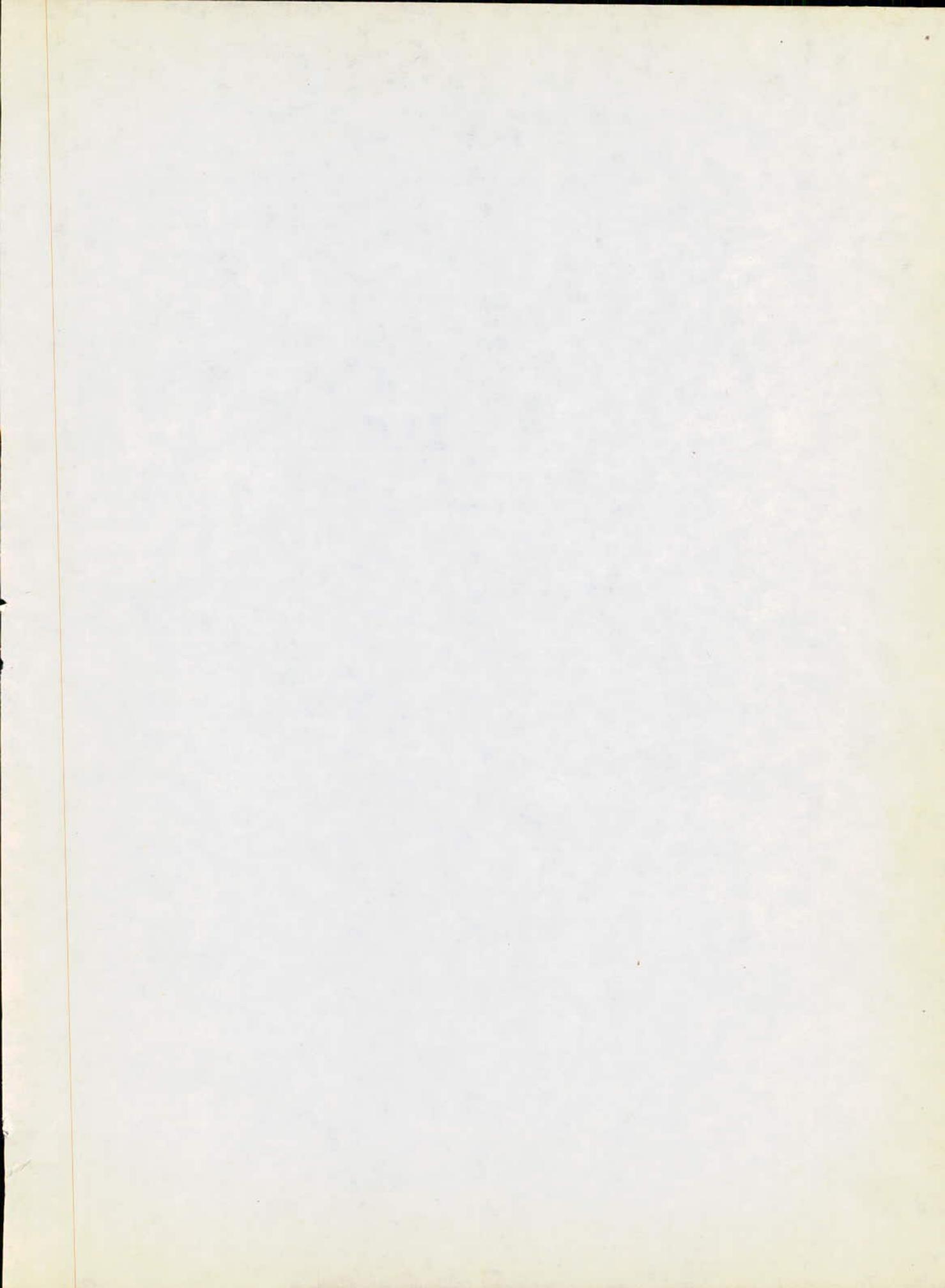
Etudié par :

M.M. HADJADJ

Dirigé par :

M.A. CIESLAK

Promotion : Janvier 1987



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المكتبة — المكتبة المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Etat

### SUJET

# **Etude Hydrodynamique dans un Appareil à Garnissage Mobil**

Proposé par :

M.A. CIESLAK

Etudié par :

M.M. HADJADJ

Dirigé par :

M.A. CIESLAK

Promotion : Janvier 1987

Département: Génie Chimique

Promoteur: A.CIESLAK

Élève ingénieur: M.HADJADJ



الموضوع : الدراسة لديناميكا مائية لجهاز باجسام صلبة متحركة.

الملخص : تتلخص هذه الدراسة على إنجاز جهاز لكريات متحركة وكذا الدراسة لديناميكا مائية لثلاث حملات غازية وسائلة وصلبة متحركة ودراسة تأثير كل من الغاز والسائل والارتفاع الثابت لكجسام الصلبة ونسبة الفراغ للسناد على انخفاض الضغط وارتفاع الجسام في حالة الحركة.

Sujet : ÉTUDE HYDRODYNAMIQUE DANS UN APPAREIL A GARNISSAGE MOBIL

Résumé: Cette memoire consiste à la construction d'un appareil de contact de 51 mm de diamètre et de 50 cm de hauteur, ainsi que l'étude hydrodynamique de trois phases gaz-liquide-solide mobil et à étudier l'influence des débits de gaz, de liquide, de la hauteur statique du lit et du pourcentage de vide du support sur les variation de la perte de charge et de la hauteur dynamique du lit.

Subject : Hydrodynamic Study in a Turbulent Contact Scrubber

Abstract: Laboratory turbulent contact scrubber of 51 mm glass tube and 10 mm polypropylene solid spheres has been constructed and examined. The experiments were carried out to determine the dependence of bed pressure drap and dynamic bed height on gaz and liquide flowrate, static bed height and support open area. This study allowed the selection of the best operating variables.

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste memoire:

A mon père

A ma mère

A mes frères et soeurs

A mes amis et à tous ceux qui me sont chers.

M. HANJANI

REMERCIEMENTS

Je transmets toute ma gratitude et mes reconnaissances à mon promoteur  
Monsieur A.CIESLAK pour leur son aide et les conseils qu'ils m'ont apportés  
tout au long de cette étude.

Mes remerciements s'adressent aussi au présidente de jury:

M<sup>elle</sup> W.YAICI

Maitre assistante

Aux membres de jury:

ABBAS TURKI

Maitre assistante.

LOUNES

Maitre assistant.

BOUMGHAR

Maitre assistant.

A.CIESLAK

Maitre de conférence.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les professeurs et assistants  
qui ont contribué à ma formation.

Que tous qui ont participé de près ou de loin à mon travail puissent trouver  
ici l'expression de ma gratitude.

M.HADJADJ

TABLES DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

	Introduction	1
I-	Premiere Partie - Partie Théorique -	
I-1-	Généralité sur les Appareils à Balles Flottantes	2
I-2-	Origines du Procédé	3
I-3-	Etude d'un Appareil à Balles Flottantes	6
I-3-1-	Ecoulement d'un Gaz et d'un Liquide à Contre courant	6
I-3-2-	Vitesse Minimale de Fluidisation	7
II	Deuxième Partie - Partie Expérimentale -	
II-1-	Description Générale de l'Installation	11
II-1-1-	Colonne	11
II-1-1-1-	Supports de Garnissage	11
II-1-1-2-	Corps de Remplissage	11
II-1-2-	Appareils de Mesure et de Réglage	11
II-1-2-1-	Mesure de Débit de Gaz	11
II-1-2-2-	Mesure de Débit de Liquide	12
II-1-2-3-	Mesure Des Pertes de Pression	12
II-2-	Choix du Modèle du processus	13
II-3-	Mode Opératoire	17
II-4-	Premiere Partie d'expériences - Garnissage Sec -	18
II-4-1-	Résultats et Interprétation	18
II-4-2-	Comparaison avec les Résultats de la Littérature	18
II-4-3-	Conclusion	23
II-5-	Deuxième Partie d' Expériences - Garnissage arrosé -	24
II-5-1-	Conditions Expérimentales	24
II-5-2-	Support de 60 % de Vide	24
II-5-2-1-	Résultats et Interprétation	24
II-5-3-	Support de 40 % de Vide	26
II-5-3-1-	Résultats et Interprétation	26
II-5-4-	Interprétation Générale des Courbes	27
II-5-5-	Conditions d'un Bon Travail	28

II-5-6-	Corrélations des Résultats Expérimentaux	28
II-5-7-	Conclusion	31
	Table des Figures	32
	Conclusion Générale	46
	Nomenclature	48
	Annexe	49
1-	Etalonnage des débitmètres de fluides	50
1-1-	Etalonnage du débitmètre de liquide	50
1-2-	Etalonnage du débitmètre d'air	52
2-	Détermination de la porosité	54
	Table des tableaux	55
	BIBLIOGRAPHIE	68

Introduction :

L'étude de l'écoulement de deux fluides à contre-courant a fait et fait encore l'objet de nombreux travaux .

L'industrie moderne met en oeuvre la technique de l'écoulement des fluides au sein des milieux granulaires dans de nombreuses applications ; filtration d'un fluide contenant des particules solides en suspension à travers les pores du gâteau, absorption gaz-liquide dans les opérations d'humidification de gaz ou déshumidification, réactions chimiques ou le fluide réactionnel traverse un lit de catalyseur, contacte liquide-vapeur à travers les garnissages de colonne de distillation .

Ces opérations peuvent être mises en oeuvre dans la colonne à film, à plateau, à garnissage .....

Les avantages que présente l'appareil à balles flottantes sont :

- L'important transfert de masse et de chaleur entre les deux fluides en comparaison avec les autres modes de contact .
- L'état isotherme de la colonne, permettant un contrôle du processus obtenu à l'aide du mélangeage rapide des particules solides .
- Il est utilisable pour des débits gaz et liquide plus élevés que pour des colonnes à garnissage .
- Leur domaine d'application peut s'étendre même pour les suspensions [ 1 ]

Notre travail consiste à la construction d'un appareil de contact, ainsi que l'étude hydrodynamique de trois phases gaz-liquide-solide mobil et à étudier l'influence des débits de gaz, de liquide, de la hauteur statique du lit et du pourcentage de vide du support sur les variations de la perte de charge et de la hauteur dynamique du lit.

PREMIERE PARTIE

PARTIE THEORIQUE

## I-1- Généralité sur les Appareils à Flottantes

Les appareils à balles flottantes permettent de réaliser des contacts gaz - liquide à contre courant à l'intérieur d'une colonne verticale comprenant soit un seul, soit plusieurs compartiments en série, figure ( 1 ).

Ces compartiments ou " étages " sont séparés par des cloisons perforées.

Chaque compartiment est doté d'un lit de sphères de faible poids spécifique. Les sphères les plus couramment employées ont un diamètre de 38 mm et un poids de 4,5 g environ, donnant un poids spécifique de l'ordre de  $0,15 \text{ g/cm}^3$  [ 2 ] ; elles sont réalisées le plus souvent en polyéthylène ou en polypropylène, quelquefois en acier inoxydable, mais d'autres matériaux peuvent également être utilisés.

Pour des débits de gaz et de liquide nuls, le lit de sphères occupe une hauteur statique  $H_s$ . En désignant par  $h$  comme étant la hauteur totale du compartiment.

Pour des débits de gaz et de liquide donnés, la colonne est parcourue de bas en haut par les gaz, tandis que le liquide descend à contre courant. Les débits de gaz et de liquide doivent être choisis de telle façon que le lit de sphères soit mis dans un état de suspension. La suspension doit remplir complètement le compartiment tout en donnant une perte de charge convenable c'est à dire comprise généralement entre 75 et 125 mmCE par étage.

On obtient cet état pour des vitesses apparentes de gaz, le plus souvent comprises entre 2 et 6,5 m/s et des de liquides de 5 à 40  $\text{l/m}^2$  [ 2 ] .

Les vitesses utilisées établissent dans l'appareil un état de turbulence élevé ( nombre de Reynolds rapporté au diamètre des sphères; compris entre 5000 et 165000 ) [ 3 ] .

Les balles constamment arrosées tournent sur elles-mêmes et s'entrechoquent dans un mouvement désordonné, créant ainsi un excellent contact gaz-liquide sans qu'aucun encrassement de l'appareil ne soit possible du fait de l'agitation des

corps de remplissage.

L'appareil est bien entendu complété à sa partie supérieure par un système d'arrosage du premier lit et par un dispositif de séparation des gouttelettes entraînées par les gaz, et à sa partie inférieure par une capacité servant à la réception du liquide.

#### I-2- Origines du procédé:

Ce procédé a été mis au point à la fin de l'année 1959 [4], presque simultanément dans deux industries différents.

Un premier appareil pilote fut expérimenté par l'Aluminium Company of Canada pour le dépoussiérage et le traitement des gaz provenant des cuves d'électrolyse d'aluminium. Ces gaz contiennent principalement . . .

- en provenance du bain: de l'alumine, de l'acide fluorhydrique et des fluorures
- en provenance de l'anode: du carbone de l'oxyde de carbone et des goudrons.

Ces goudrons sont en suffisamment grande quantité pour proscrire l'emploi d'un tour à garnissage classique.

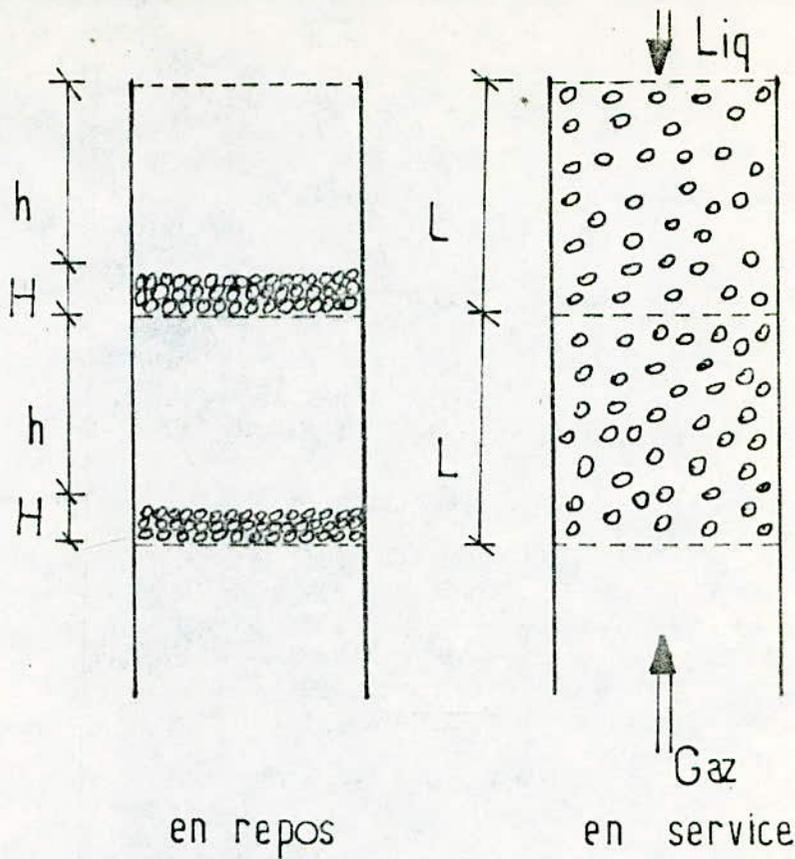
Cet appareil à grille supérieure non plane et à faible hauteur h de compartiment figure ( 2 ) et permit après mis au point de résoudre d'une façon très satisfaisante le problème de autodécrassage des goudrons et de la récupération des fluorures.

Un deuxième appareil pilote à grille supérieure plane et à grande hauteur h de compartiment, figure ( 3 ) fut expérimenté par la Dominion Tar and Chemical Company dans une usine de fabrication de pâte à papier. Des réalisations industrielles ont suivi ces essais pour des opérations telles que:

- absorption de  $SO_2$  par  $NaOH$ ,  $NaCO_3$  ou  $Mg(OH)_2$ .
- absorption de  $CO_2$  par une solution de vanillate de sodium.

- condensation de vapeur d'eau et absorption de blanchiment pour la désodorisation du soufflage des digesteurs Kraft.

Ce nouvel appareil de contact gaz-liquide donnant de bons coefficients de transfert de masse et de chaleur [1, 4].



en repos

en service

FIG (1)

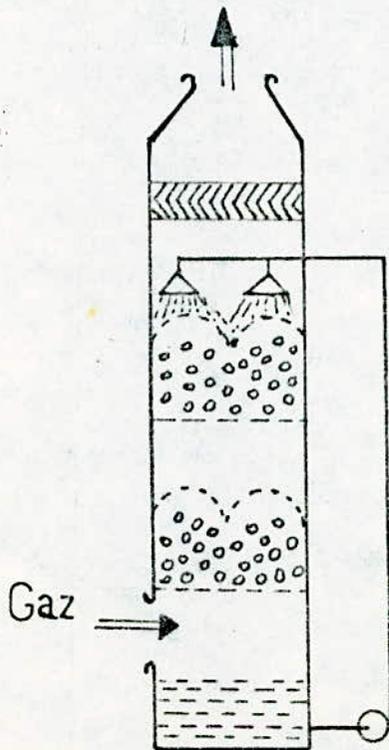
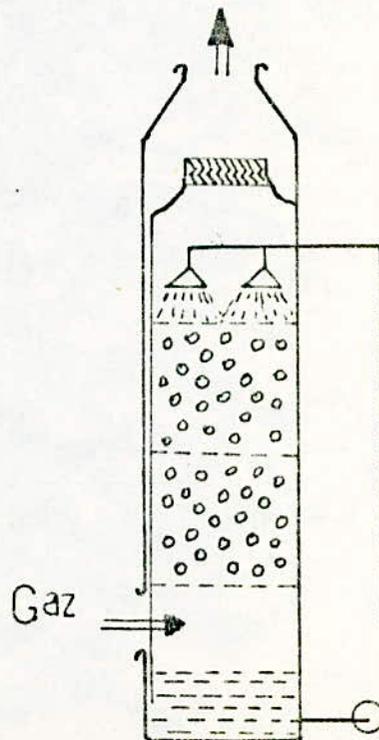


FIG (2)



FIG(3)

### I-3-Etude d'un appareil à balles flottantes

Deux considérations principales vont être nécessaires pour dimensionner un appareil à balles flottantes où l'expérience joue un rôle primordial dans cette étude, car il manque une grande théorie.

Dans une première étude on se placera sur le plan de la dynamique. Etant donné les débits de gaz, de liquide et un état de turbulence à réaliser ( en restant sur des limites acceptable de la perte de charge ); la construction de l'appareil, les conditions opératoires et les propriétés physico-chimiques des deux fluides ont de grands effets sur la détermination de tous les paramètres qui caractérisent un appareil à balles flottantes.

Dans une deuxième étude on cherchera quelle doit être l'efficacité de séparation dans un compartiment puis le nombre d'étage pour obtenir une efficacité désirée.

On pourra appliquer aux appareils à balles flottantes les lois élémentaires de génie chimique et déterminer certains paramètres tel que les coefficients de transfert de matière, de chaleur, la hauteur dynamique, les aires interfaciales, la vitesse minimale de fluification, la perte de charge [ 2 ], comme on le fait pour les colonnes à garnissage. On n'évitera pas toujours d'effectuer les essais sur pilotes mais on prendra quelques éléments en considération pour les appareils à l'échelle industriel.

Dans notre cas on sera intéressé par la première étude c'est à dire l'étude hydrodynamique.

#### I-3-1- Ecoulement d'un gaz et d'un liquide à contre-courant:

Dans les colonnes à garnissage, le problème de l'écoulement se complique. Le liquide descendant à travers le lit mouille les particules et obstrue une certaine

proportion des interstices de sorte que le passage libre offert au gaz est réduit par rapport au garnissage sec. De même de petites poches de gaz peuvent s'accrocher aux particules, mais ce volume mort occupé par le liquide et on pourra le négliger. Le film de liquide accroché aux particules sous l'action des forces de tension superficielle, réduit la section de passage offert au gaz, ce qui contribue à augmenter la perte [5].

Les garnissages utilisés dans ces colonnes ont les formes les plus variées. Ils sont conçus pour offrir le maximum de surface de contact entre le film liquide et le gaz afin d'améliorer le transfert de masse entre les deux phases. D'autre part, ils ne doivent pas provoquer de pertes de charge trop importantes. Leur forme résulte donc d'un compromis entre ces deux points de vue opposés.

Dans les appareils à balles flottantes le liquide descendant provoquera l'augmentation de la rétention du liquide, qui à son tour diminue l'espace libre offert au gaz, ceci entraîne l'augmentation de la vitesse réelle à travers la colonne qui va à son tour accroître le transfert de quantité de mouvement entre les particules solide et le gaz on verra ainsi l'augmentation de la poussée d'ARCHIMEDE, ceci aura pour effet l'accroissement de la hauteur dynamique et la perte de charge.

### I-3-2- Vitesse Minimale de Fluidisation:

On considère le cas d'un lit de fines particules non arrosé (sec) de hauteur  $h$ . Pour un faible débit d'air, les particules restent immobile et  $h$  constant. En accroissant le débit d'air, on observe un soulèvement rapide des particules jusqu'à une hauteur  $h_{mf}$ , cet état du lit correspond à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$  caractérisé par la nouvelle valeur du porosité  $\xi_{mf}$ , ainsi qu'une augmentation de la perte de charge  $\Delta P_{mf}$ . Si on augmente encore le débit d'air les particules se mettent toutes en mouvement à la manière d'un liquide, C'est l'état de fluidisation.

Au court du commencement de fluidisation on a:

la force de pression = poids des particules

C'est à dire que

$$\left( \begin{array}{l} \text{chute de pression} \\ \text{à travers un lit} \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{l} \text{surface} \\ \text{de la colonne} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{volume} \\ \text{du lit} \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{l} \text{fraction} \\ \text{solide} \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{l} \text{poids spécifique} \\ \text{que du solide} \end{array} \right)$$

$$\Delta P \cdot A = A \cdot h_{mf} \cdot (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{h_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \quad (2)$$

La chute de pression pour un lit fixe est donné par la corrélation d'ERGUN [6]

$$\frac{\Delta P}{h} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu}{(\phi d)^2} \cdot U + 1,75 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho_g}{\phi d} \cdot U^2 \quad (3)$$

La vitesse au minimale de fluidisation est obtenue en combinant les expressions (2) et (3).

$$\frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3} \cdot \left( \frac{d U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 (1 - \epsilon_{mf})}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} \cdot \left( \frac{d U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2}$$

Dans le cas qui nous intéresse, nous avons en plus un débit de liquide d'arrosage traversant le compartiment.

Un cas pratique donnant la variation de la perte de charge en fonction du débit gazeux, figure (3').

Variation de la perte de charge en fonction du débit gazeux  
pour un débit de liquide donné

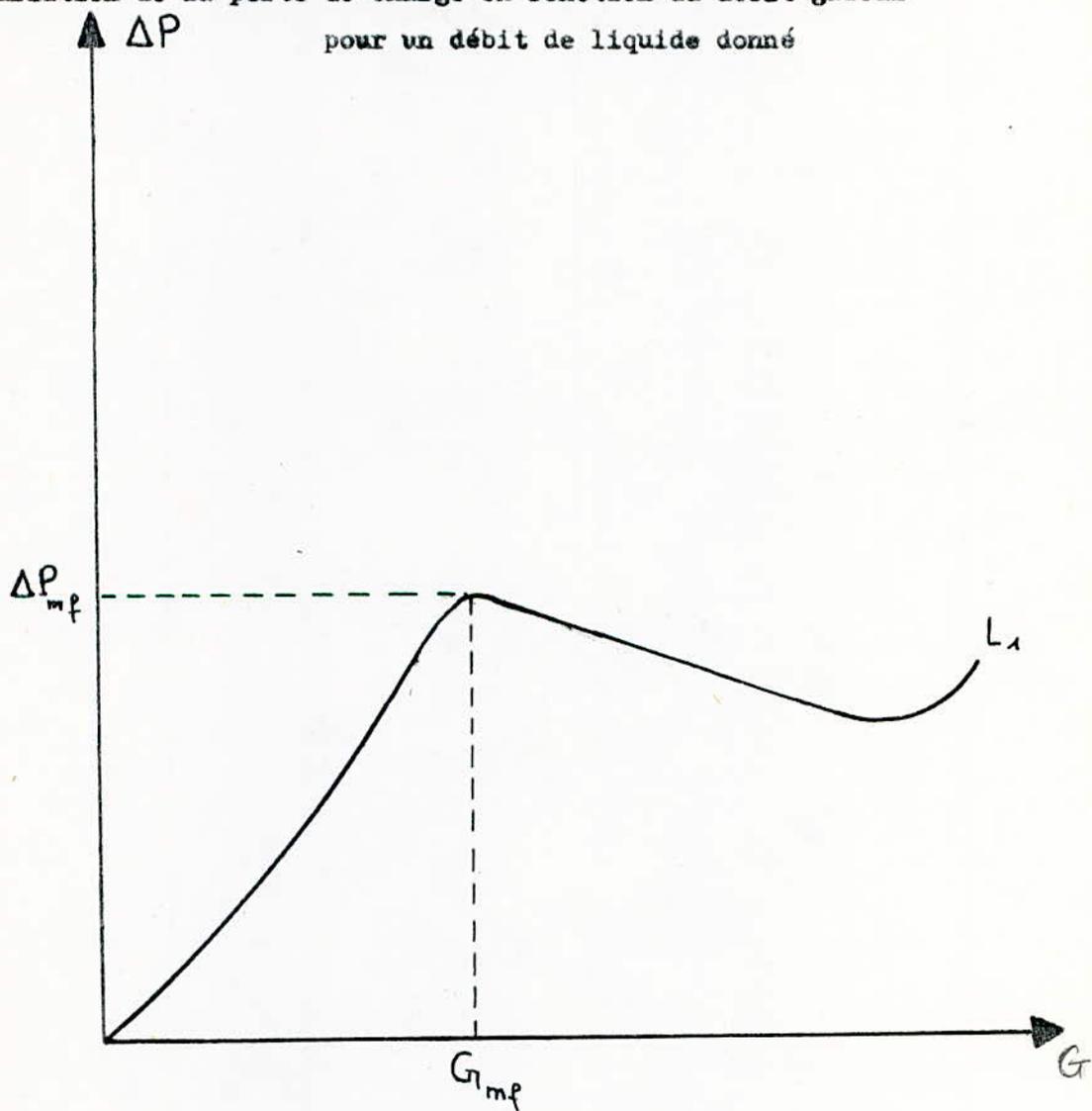


Figure ( 3' )

DEUXIEME PARTIE

PARTIE EXPERIMENTALE

## II-1- Description générale de l'installation:

Elle se divise principalement en deux parties

1- La colonne

2- L'appareillage de réglage et de mesure

### II-1- La colonne

C'est un tube vertical en verre de diamètre intérieur de 51 mm et de 50 cm de hauteur.

L'équipement de la colonne;

#### II-1-1- Supports de garnissage:

Sont des plaques en polychlorure de vinyle ( PCV ) perforées, l'une de 60 % de vide et l'autre de 40 % de vide figure ( 7 ).

#### II-1-2- Corps de remplissage:

Ce sont des grains sphériques ( balles ) en polypropylène, ses caractéristiques sont données dans le tableau ( 1 ).

La colonne est complétée à sa partie supérieure par un système d'arrosage du premier lit et par un dispositif de séparation des gouttelettes entraînées par le gaz, et sa partie inférieure par une capacité servant à la distribution des gaz et à la réception du liquide, voir le schéma d'installation figure( 6 ).

#### II-1-2- Appareils de réglage et de mesure:

##### II-1-2-1- Mesure de débit de gaz:

Le débit de gaz est mesuré à l'aide d'un rotamètre dont le débit maximum dans T.P.N est  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ .

L'autre débits de gaz sont mesurés par l'intermédiaire de rotamètre préalablement étalonné, voir annexe figure(1-2).

## II-1-2-2- Mesure de débit de liquides:

La colonne est alimentée en eau à l'aide d'une pompe centrifuge, la mesure du débit est obtenue grâce à un débitmètre qui est préalablement étalonné figure (1-1) dans l'annexe.

## II-1-2-3- Mesure des pertes de pression:

La chute de pression de long de la colonne est mesurée à l'aide d'un manomètre en eau. La distance séparant les prises de pression est  $L = 80$  cm.

## LES CARACTERISTIQUES DES BALLEs

Grandeur	Diamètre	Masse spécifique	Porosité	Aires spécifiques
Unité	$10^3$ m	$\text{Kg.m}^{-3}$	%	$\text{m}^{-1}$
Symbole	$d_p$	$\rho_s$	$\epsilon_r$	$a_p$
Valeur mesurée	10	239,126	40,536	600

Tableau ( 1 )

## II-2- Choix du modèle du processus

A tout processus de la technologie chimique comportant un déplacement de liquide et de gaz correspond un modèle mathématique. ce modèle mathématique est crée en s'orientant d'après le but auquel sont destinés les processus et les problèmes d'études qui lui sont liés.

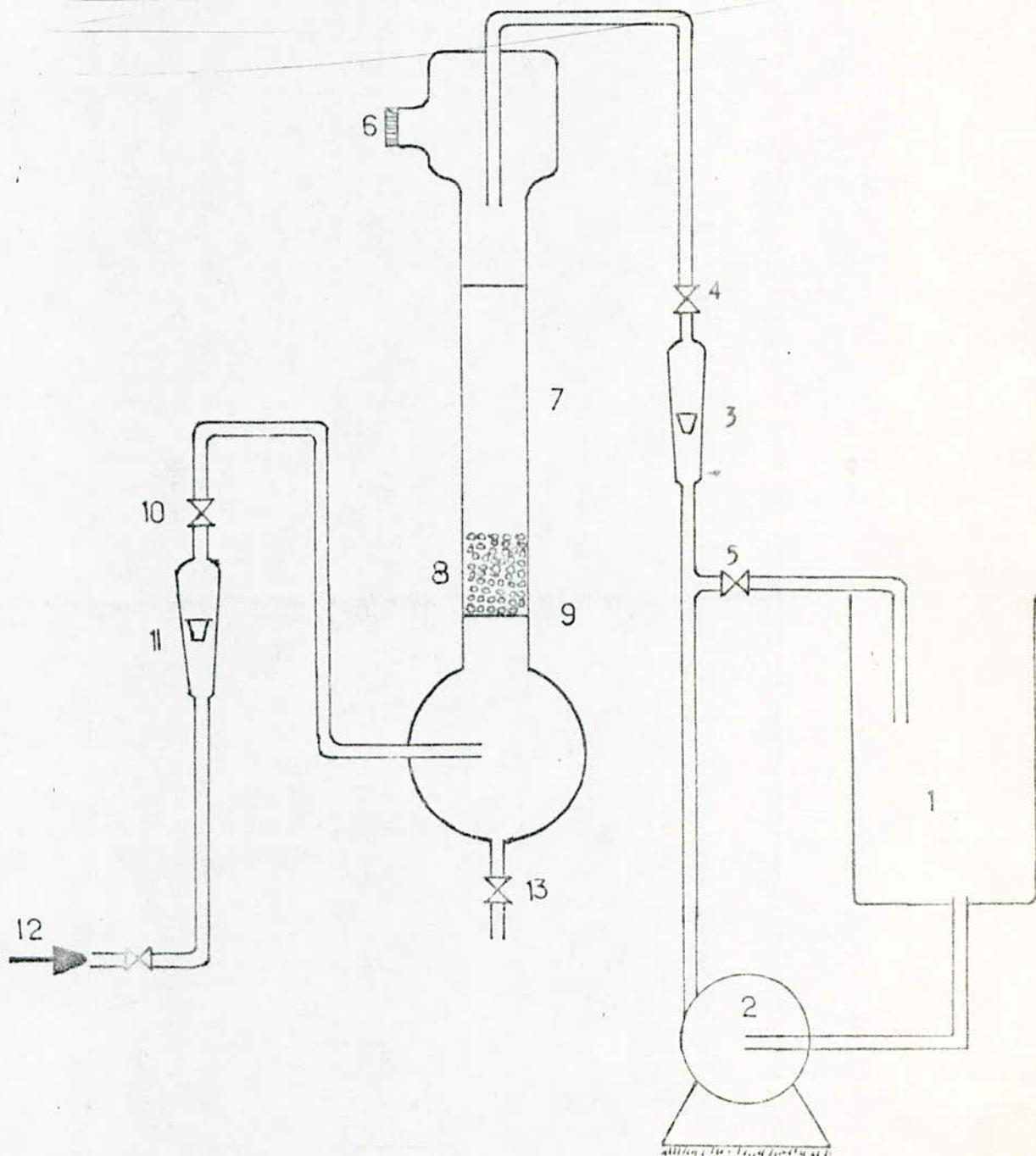
On commence par examiner le modèle dynamique du processus en tant qu'infrastructure de la description dynamique, puis en tenant compte des conditions hydrodynamiques du modèle donné.

L'étude finale, est constituée par la réunion des descriptions de tous les processus " élémentaires " examinés en un système unique à simuler.

Lors du choix du modèle, il est indispensable de tenir compte de ce qui suit;

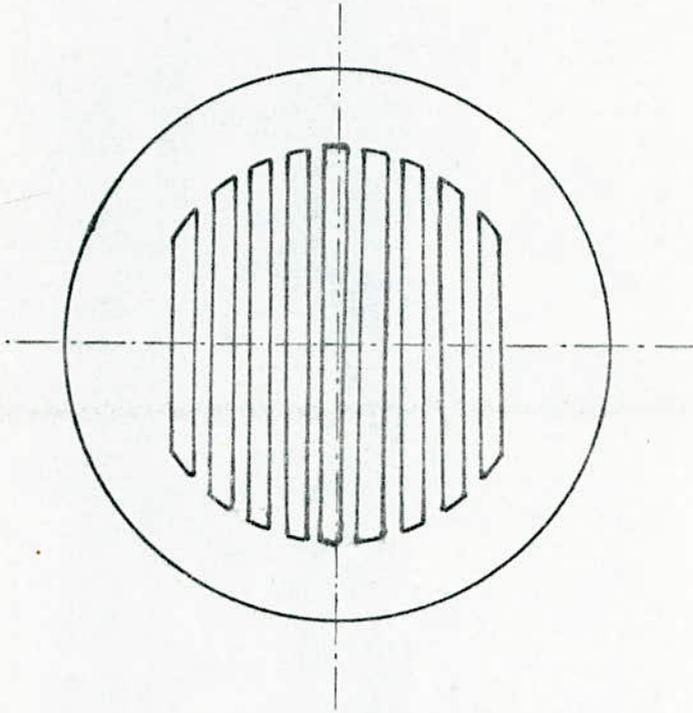
- Le modèle doit refléter le plus complètement possible le caractère des flux de matière et d'énergie, tout en faisant appel à une description mathématique suffisamment simple.
- Les paramètres du modèle doivent être déterminés par voie expérimentale ou autre.

Pour tester l'adequation du modèle, on commence par constater que la structure hydrodynamique choisie est bien conforme aux courant du système étudié. Si la courbe de réponse expérimentale trouvée par la méthode de la perturbation coïncide avec la représentation graphique de la solution ceci confirme qu'il est possible d'employe le modèle adopté.



## Legende

- 1- Bac d'alimentation
- 2- Pompe centrifuge
- 3- Débitmètre phase liquide
- 4- Vanne pour réglage du débit d'eau
- 5- By-pass
- 6- Sortie du gaz
- 7- colonne
- 8- Corps de remplissage
- 9- Support de remplissage
- 10- Vanne pour réglage du débit de gaz
- 11- Débitmètre phase gazeuse
- 12- Compresseur
- 13- Sortie du liquide



SUPPORT DE GARNISSAGE

Figure ( 5 )

On fait une brève étude concernant l'écoulement de la phase gazeux (monophasique) notamment de voir les phénomènes de fluidisation à garnissage sec (non arrosé) et de comparer les résultats expérimentaux à ceux de la littérature.

### II-3- Mode opératoire:

Notre mode opératoire comporte deux parties l'une à garnissage sec et l'autre à garnissage arrosé pour deux supports différents l'un de 60 % de vide et l'autre de 40 %.

Après avoir placé le support ainsi que les corps de remplissage (balles) à une hauteur désirée (hauteur statique).

Nous ouvrons les vannes, 4, 5, 10 et 13 voir le schéma d'installation figure (4).

Nous mettons le compresseur et la pompe en marche. Nous fixons un débit de liquide L à l'aide d'un rotamètre et faisons varier le débit gazeux G à l'aide d'un débitmètre qui sont préalablement étalonnés, attendons jusqu'à ce que le régime permanent soit établi.

En relevant à chaque fois la perte de charge et la hauteur dynamique du lit.

Nous procédons de la même manière pour les différents débits liquide et hauteurs statiques

II-4- Première Partie d'Expériences:  
 -o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

Dans cette partie d'expériences on a effectué une série de mesure pour un garnissage sec, de la perte de charge et de la hauteur dynamique en fonction du débit gazeux pour différentes hauteurs statiques du lit.

II-4-1- Résultats et Interprétation:

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ( 2 ) et traduit graphiquement sur la figure ( 6 ) représentant la variation de la perte de pression en fonction du débit gazeux pour un support de 60 % de vide. De ses résultats on peut tirer la vitesse minimale de fluidisation qui correspond en fait au premier changement de la hauteur dynamique.

-) Pour une hauteur statique de  $5 \cdot 10^{-2}$  m on trouve:

$$U_{mf} = 1,36 \text{ m/s}$$

-)  $H_s = 7,5 \cdot 10^{-2}$  m

$$U_{mf} = 1,36 \text{ m/s}$$

-)  $H_s = 10 \cdot 10^{-2}$  m

$$U_{mf} = 1,23 \text{ m/s}$$

II-4-2- Comparaison avec les Résultats de la littérature.

-) L'équation de LEVA:

La corrélation de LEVA est donnée par l'expression suivante [7].

$$\Delta P = 2 \cdot H_d \cdot f \cdot \frac{U_{mf} \cdot \rho_g}{d} \cdot \left( \frac{1 - \epsilon_1}{\phi} \right)^{3-n} \cdot \frac{1}{\epsilon_1^3}$$

L'expression de LEVA peut être écrite sous une autre forme [8].

$$\Delta P = \frac{a}{R_e^{n-2}} \cdot \frac{H_d}{d} \cdot \frac{U_g^2}{2} \cdot \rho_g \cdot \left( \frac{1 - \epsilon_1}{\phi} \right)^{3-n} \cdot \frac{1}{\epsilon_1^3}$$

qui est applicable pour un lit fixe, les résultats obtenus par la corrélation de LEVA sont représentés sur la figure ( 6 )

Exemple de calcul:

$a = 7$  pour les corps lisses

$\phi = 1$  particules sphériques

$$\rho_g = 1,29 \text{ kg/sm}^2$$

$$\mu_f = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$d = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Pour un débit gazeux de  $70,918 \cdot 10^{-2} \text{ kg/sm}^2$  et une hauteur statique de  $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

$$\epsilon_1 = 40,54 \%$$

Voir annexe

$$R_e = \frac{G \cdot d}{\mu_f}$$

Ce qui implique de la figure ( 1-4 ),  $n = 1,892$

on trouve  $\Delta P = 109,769 \text{ Pa}$

$$\text{L'erreur} \quad \left| \frac{\Delta P_e - \Delta P_L}{\Delta P_e} \right| = \frac{127,361 - 109,769}{127,361} = 13,81 \%$$

On remarque que l'erreur entre les points expérimentaux et les points calculés par la corrélation n'est pas assez important.

-) Nous avons vu dans le premier chapitre que l'équation donnant la vitesse minimale de fluidisation s'écrit [6]

$$\frac{1,75}{\phi \epsilon_{mf}^3} \cdot \left( \frac{d \rho_g}{\mu} \right)^2 U_{mf}^2 + \frac{150 (1 - \epsilon_1)}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} \cdot \left( \frac{d \rho_g}{\mu} \right) U_{mf} = \frac{d^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2}$$

On fait des applications numériques pour des différentes hauteurs statiques du lit.

Avec

$$\phi = 1 \quad \text{Particules sphériques}$$

$$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

$$\rho_B = 239,126 \text{ kg/sm}^2$$

$$d = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho_G = 1,29 \text{ kg/sm}^2$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Pour une hauteur statique de  $5,10^{-2} \text{ m}$ , on trouve

$$U_{mf} = 0,97 \text{ m/s}$$

$$\rightarrow H_B = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$U_{mf} = 0,92 \text{ m/s}$$

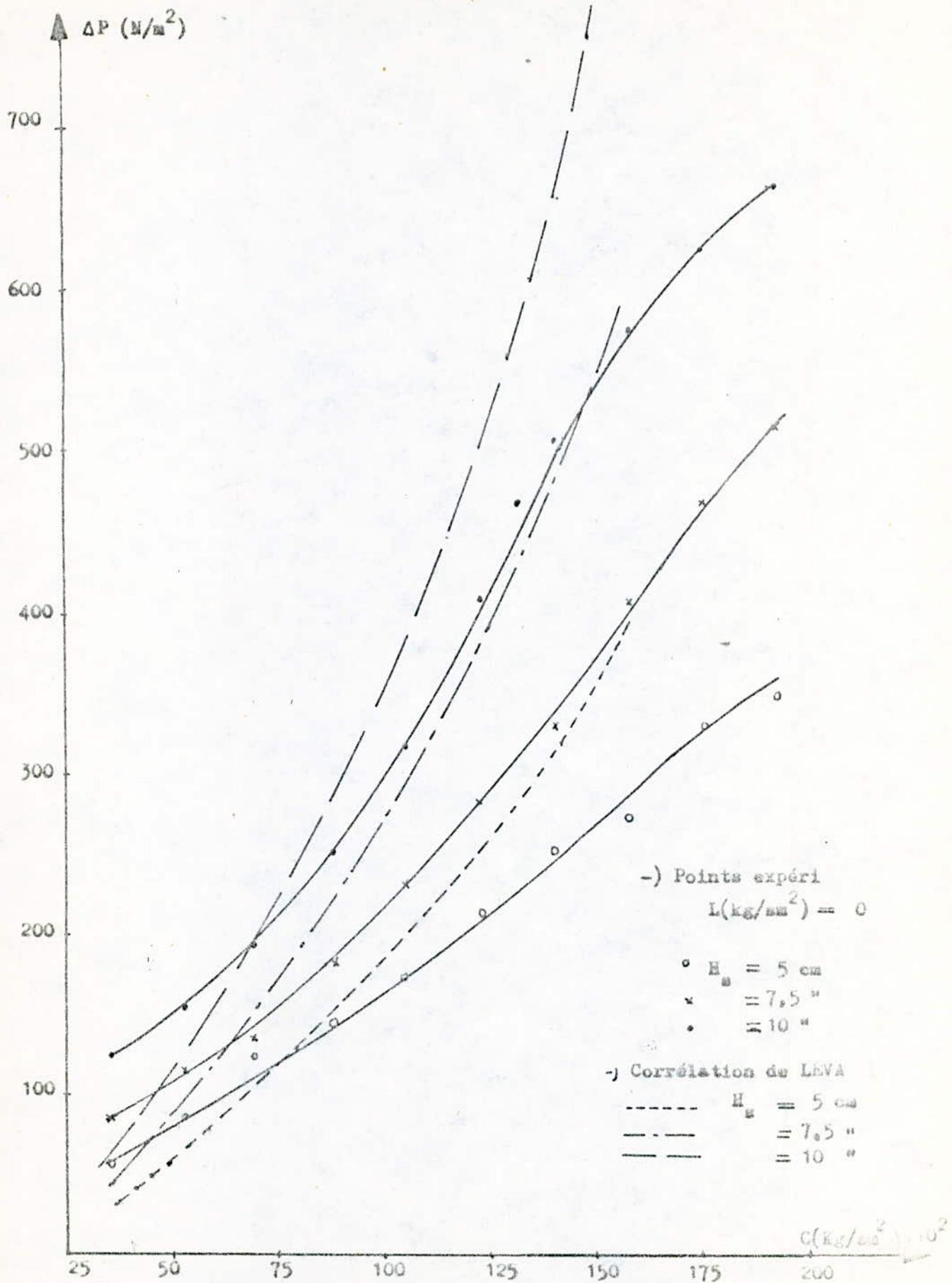
$$\rightarrow H_B = 10 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$U_{mf} = 0,82 \text{ m/s}$$

L'erreur

$$\frac{U_{mf\epsilon} - U_{mf\kappa}}{U_{mf\kappa}} = \frac{1,36 - 0,92}{1,36} = 32,35 \%$$

On trouve une erreur assez importante de 32,35 %, ceci est dû aux fait à l'utilisation des particules de grands diamètre.



Variation de la perte de charge en fonction du débit gazeux

Figure (6)

$$T_{\text{air}} = 14,5^{\circ}\text{C}$$

$$P = 772,4 \text{ mmHg}$$

	$H_s = 5 \cdot 10^2 \text{ (m)}$		$H_s = 7,5 \cdot 10^2 \text{ (m)}$		$H_s = 10 \cdot 10^2 \text{ (m)}$	
$G \text{ (kg/s m}^2\text{)}$ $10^2$	$L \text{ (kg/s m}^2\text{)} = 0$					
	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	$H_d \cdot 10^2 \text{ (m)}$	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	$H_d \cdot 10^2 \text{ (m)}$	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	$H_d \cdot 10^2 \text{ (m)}$
52,918	88,173	5	117,564	7,5	156,752	10
70,473	127,361	5	137,160	7,5	195,940	10
88,186	146,955	5	186,143	7,5	254,722	10
105,438	176,346	5	235,130	7,5	323,301	10
123,011	215,553	5	284,113	7,5	414,474	10
140,517	254,722	5	333,098	7,5	509,444	10
158,059	274,316	5	411,474	7,5	578,023	10,1
175,602	333,098	5,5	470,256	8	627,010	10,8
193,145	352,692	7	519,241	9,9	666,196	12,6
210,706	362,490	7,8	538,835	10,9	685,790	14,0
228,224	382,083	8,6	548,632	12,1	690,690	15,3
244,459	391,900	9,4	553,531	12,9	695,590	16,5
261,919	401,677	10	553,429	14,3	700,486	18

Tableau(2)

## II-4-3- Conclusion

Les courbes expérimentales répondent bien à la forme des courbes obtenues par la corrélation de LEVA avant la fluidisation avec une erreur de 17 %. Ces écarts sont principalement causés par l'appareillage qui n'est pas très adéquat. En l'occurrence le manomètre à eau qui ne peut donner des valeurs très exacts ainsi qu'une règle classique pour la mesure de la hauteur dynamique. Cette dernière est la cause de l'écart des points expérimentaux et ceux calculés par la corrélation.

## II-5-- Deuxième Partie d'Expériences:

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

## II-5-1- Conditions Expérimentales:

Chaque appareil est défini par un intervalle d'application des différentes paramètres.

Le notre est caractérisé par les conditions suivantes:

$$5.10^{-2} \ll H_s \ll 10.10^{-2}$$

$$27,195 \ll L(\text{kg/cm}^2) \ll 40,793$$

$$37,274 \ll G(\text{kg/cm}^2).10^2 \ll 133,91$$

Les valeurs sont limitées par le domaine de l'homogénéité des trois phases gaz-liquide-solide au-dessus du support de garnissage.

Au delà de ces valeurs des petites perturbations apparaissent les balles s'accumulant en haut et la formation de deux couches.

## II-5-2- Support de 60 % de vide:

Dans cette partie on se proposera d'effectuer une série de mesure pour un garnissage arrosé, de la perte de charge et de la hauteur dynamique du lit en fonction du débit gazeux pour différents débits de liquide et hauteurs statiques

## II-5-2-1-Résultats et Interprétation

Les résultats obtenus expérimentaux sont récapitulés dans les tableaux ( 4 ) à ( 9 ) et représentés graphiquement sur les figures ( 7 ) à ( 12 ), les variations de la perte de charge et de la hauteur dynamique en fonction du débit gazeux pour des débits liquides et des hauteurs statiques données.

Nous constatons que

- la hauteur dynamique croît avec l'augmentation du débit gazeux pour un débit

liquide donné, figures ( 7 ) à ( 9 )

- Pour un débit gazeux et de liquide donnés, la hauteur dynamique croit avec la hauteur statique, figures ( 8 ) et ( 9 ).
- Pour un débit de liquide fixé la perte de charge croit avec la hauteur dynamique.
- La perte de charge augmente avec le débit de liquide pour un débit de <sup>gaz</sup> donné.
- A plus grande vitesse de gaz et a plus forte hauteur statique du lit, la perte de charge augmente toujours avec le débit de gaz. en effet dans ce cas la résistance opposée par les gaz à l'écoulement de liquide l'emporte sur l'avantage crée par l'accroissement de la hauteur dynamique du lit et la quantité de liquide finalement retenue par le lit augment.

Les figures ( 10 ) à ( 12 ) montrent l'évolution de la perte de charge en fonction du débit de gaz croissant pour différents débits de liquide.

### II-5-3-Support de 40 % de vide :

On procédera de la même manière seulement en changeant le support qui cette fois ci présente 40 % de vide. Cette série d'expérience porte aussi sur l'exploitation des courbes, et essayons de voir voir aussi l'influence du pourcentage de vide.

#### II-5-3-1-Résultats et interprétation:

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux ( 10 ) à ( 15 ) et rapportés sur les figures ( 13 ) à ( 18 ), présentant la variation de la perte de charge et de la hauteur dynamique en fonction du débit de liquide (  $L = 27,195 \text{ Kg/sm}^2$  ,  $L = 33,994 \text{ Kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$  et  $L = 40,793 \text{ Kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$  ) et hauteur statique (  $H_s = 5.10^{-2} \text{ m}$  ,  $H_s = 7,5.10^{-2} \text{ m}$  et  $H_s = 10.10^{-2} \text{ m}$  ).

Nous constatons que:

- Pour un support de 40 % de vide l'augmentation de la hauteur dynamique et de la perte de charge se fait d'une façon plus nette que celle de 60 % de vide.
- Les allures des courbes ne sont pas régulières et présentant parfois des pics ceci est dû à un changement quantitative et caractéristique du système gaz-liquide.
- Plus le pourcentage de vide du support diminue plus l'homogénéité des trois phases devient moins bonne.

Les figures ( 16 ) à ( 18 ) montrent l'évolution de la perte de charge en fonction du débit gazeux croissant pour différents débits de liquide.

## II-5-4- Interprétation Générale des Courbes

Les allures des courbes présentant les variations de la perte de charge et de la hauteur dynamique en fonction des débits de gaz, de liquide et de la hauteur statique des corps de remplissage peuvent s'interpréter de la façon suivante.

Pour un débit de liquide  $L$  et une hauteur statique du lit  $H_s$  données l'augmentation de débit gazeux dans le domaine de validité définit par les conditions expérimentales provoque un accroissement de la perte de charge et de la hauteur dynamique, ceci s'explique par le fait que lorsque nous augmentons le débit gazeux l'écoulement du gaz à travers la colonne est gêné par les particules et le liquide descendant provoquera une augmentation de la rétention du liquide qui à son tour diminue l'espace libre d'où l'augmentation de la perte de pression et de la hauteur dynamique.

Pour une hauteur statique du lit supérieure la hauteur dynamique et la perte de charge augmentent mais d'une façon plus nette que précédemment avec l'accroissement des débits de gaz et de liquide, ceci est dû à l'augmentation du frottement avec les corps de remplissage.

Pour un support de 40 % de vide la rétention du liquide augmente, ce qui entraîne un accroissement de la vitesse réelle à travers le lit des particules, ceci est dû à la diminution de la section de passage offert au gaz, ce qui contribue à l'augmentation de la hauteur dynamique et de la perte de charge,

### II-5-5- Conditions d'un Bon Travail

Nous constatons dans le domaine défini ci-dessous une bonne homogénéité des trois phases ( gaz-liquide-solide ) ce qui nous permet la réalisation d'un mélange uniforme du point de vue concentration ou température, ceci à pour conséquence notamment l'amélioration de transfert de masse ou de chaleur.

$$27,195 \ll L(\text{kg}/\text{sm}^2) \ll 40,793$$

$$50 \cdot 10^{-2} \ll G(\text{kg}/\text{sm}^2) \ll 125 \cdot 10^{-2}$$

$$5 \cdot 10^{-2} \ll H_B (\text{m}) \ll 7,5 \cdot 10^{-2}$$

Un support de 60 % de vide.

Ces conditions déterminent le domaine où les coefficients de transferts de masse et de chaleur sont importants car il y'a un bon contact gaz-liquide.

### II-5-6- Corrélations des Résultats Expérimentaux

La variation de  $\ln \Delta P$  en fonction de  $\ln G$  représentée sur la figure ( 19 ) est linéaire pour chaque débit de liquide donné, à une hauteur statique de 7,5cm et un support de 60 % de vide, ce qui nous permet décrire;

$$\Delta P = K \cdot L^n \cdot G^m \quad (1)$$

Linearisation de l'expression (1).

$$\ln \Delta P = \ln K + n \ln L + m \ln G \quad (2)$$

On utilise la méthode différentielle pour déterminer les paramètres qui caractérisent l'expression (2), qui décrit le mieux la relation entre la perte

de charge et les débits de liquide et de gaz.

Nous supposons que:

$$Y_p = C + n X_p + m Z_p \quad (3)$$

Nous définissons une fonction  $F(C, n, m)$  tel que

$$F(C, n, m) = \sum_{i=1}^p (Y_p - Y_p)^2$$

Avec

$Y_p$ : la valeur de la perte de charge trouvée expérimentalement

$Y_p$ : la valeur de la perte de charge calculée par (3)

$X_p$ :  $\ln L$

$Z_p$ :  $\ln G$

$C$ :  $\ln K$

Pour minimiser l'écart entre les points expérimentales et les points trouvées par l'expression (3), il faut que ;

$$\frac{\partial F(C, n, m)}{\partial C} = 0$$

$$\frac{\partial F(C, n, m)}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial F(C, n, m)}{\partial m} = 0$$

A partir des ces trois équations, on tire les constantes  $C$ ,  $n$  et  $m$

On trouve que

$$C = 4,751$$

$$n = 0,856$$

$$m = 0,324$$

En remplaçant dans l'expression (3) et on tire l'équation de  $\Delta P$

$$\Delta P = 115,735 \cdot L^{0,856} \cdot G^{0,324}$$

On applique la même méthode pour déterminer la corrélation de la hauteur dynamique. On trouve

$$C = 4,075$$

$$n = 0,860$$

$$m = 0,658$$

D'où

$$H_d = 0,017 \cdot L^{0,860} \cdot G^{0,658}$$

Conditions de validité.

$$34 \ll L \text{ ( kg/sm}^2 \text{ )} \ll 40,8$$

$$45,9 \ll G \text{ ( kg/sm}^2 \text{ )} \cdot 10^2 \ll 123$$

L : débit massique spécifique du liquide.

G : débit massique spécifique du gaz.

Les deux relations précédentes, traduisant la perte de charge et la hauteur dynamique en fonction des débits liquide et gazeux ne sont pas linéaires, dans les deux cas, l'exposant du débit du liquide l'emporte sur celui du gaz, ce qui entraîne une influence plus nette du débit liquide sur la hauteur dynamique et la perte de charge.

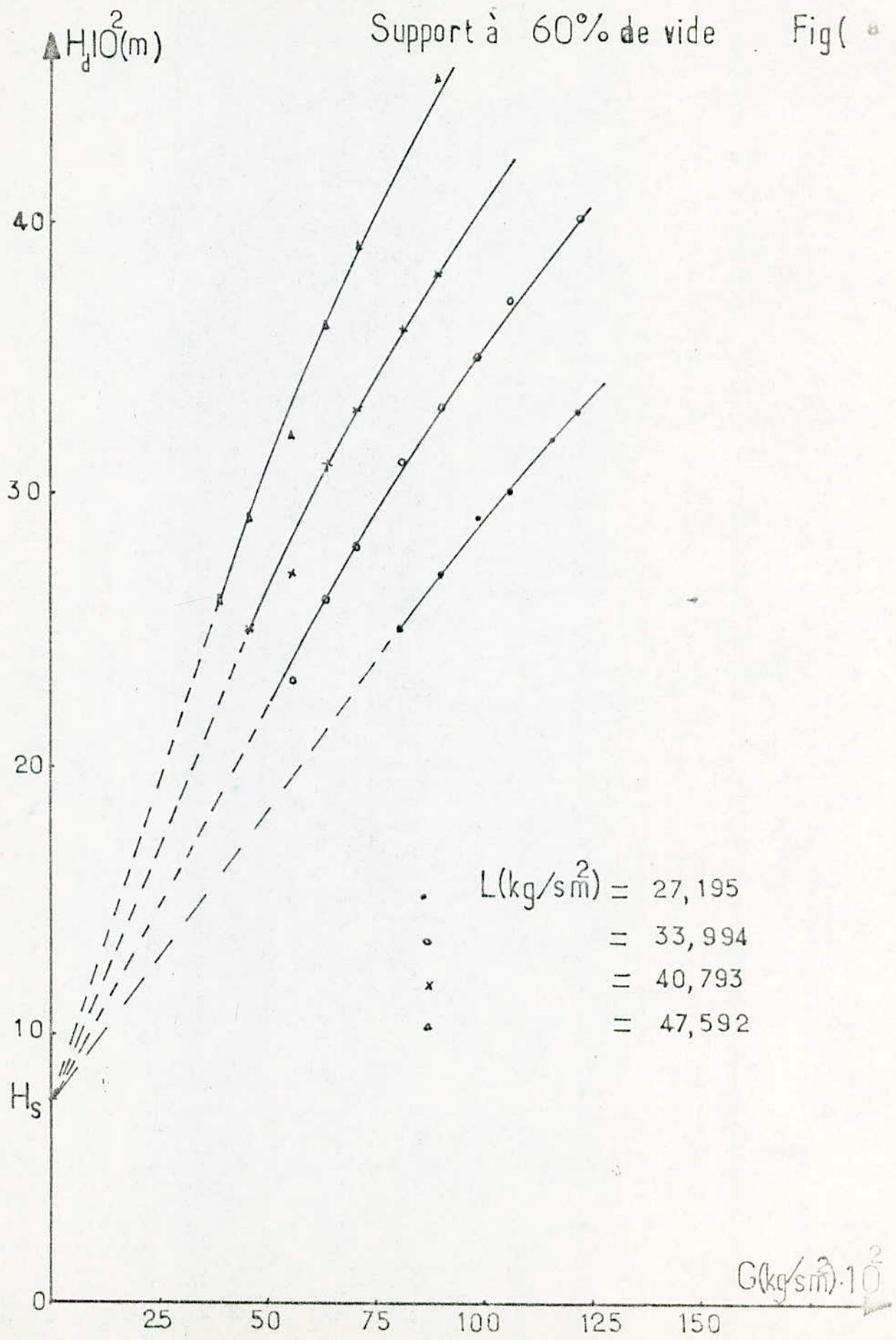
## II-5-7-1 Conclusion

La hauteur dynamique du lit et le pourcentage de vide du support jouent un rôle essentiel dans tous les phénomènes d'échange. Les perturbations amenées par les arêtes, l'augmentation de contacts gaz-liquide ont pour résultat d'une part le rendement, d'autre part des pertes de frottement et des pertes de charge.

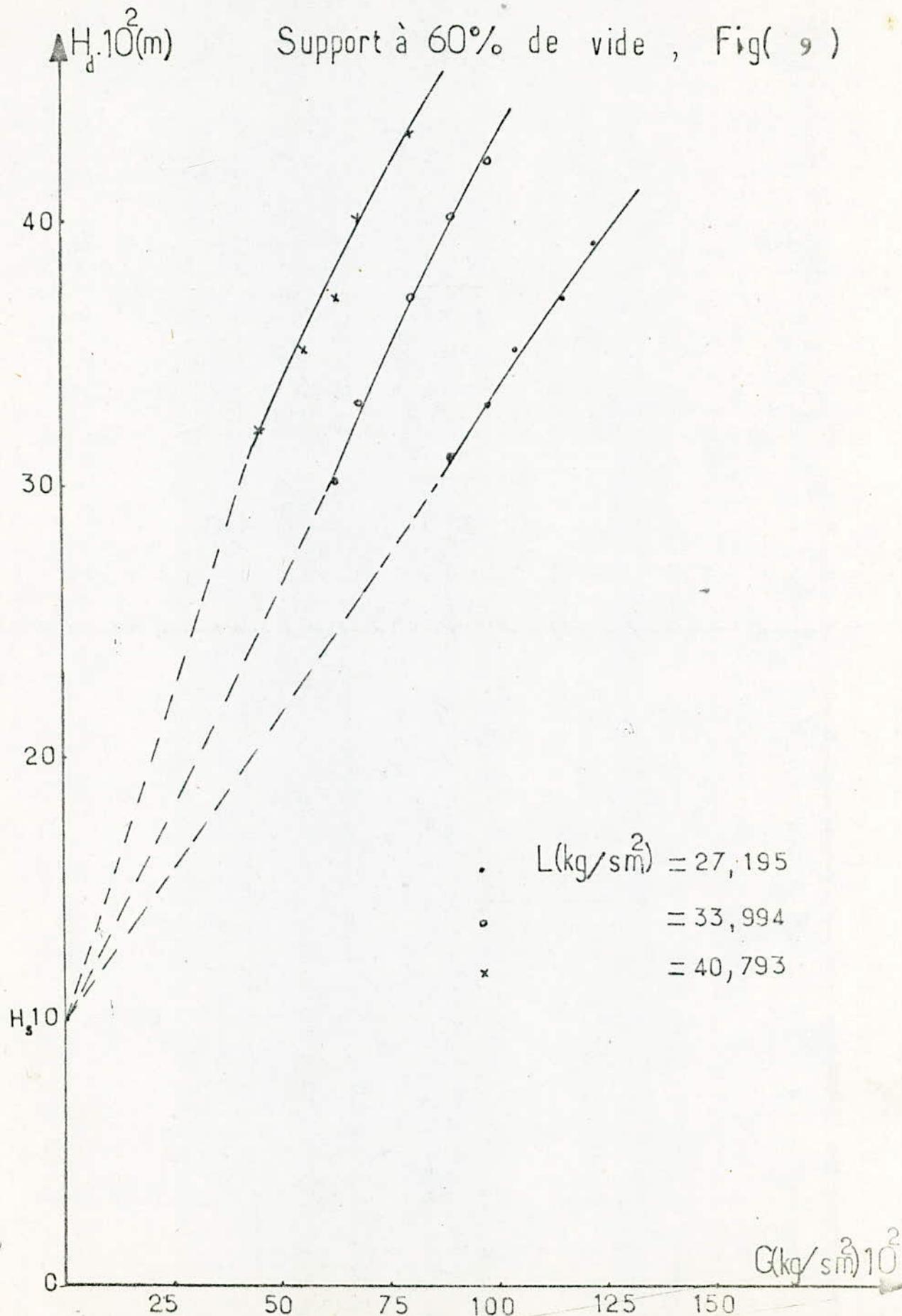
32  
TABLE DES FIGURES.

% de vide du support	N° de figure	Titre
60	7	- Variation de la hauteur dynamique en fonction du débit gazeux pour différents débits liquides et une hauteur statique du lit de $5 \cdot 10^{-2}$ m.
60	8	- Variation de la hauteur dynamique en fonction du débit gazeux pour différents débits liquides et $H_s = 7,5 \cdot 10^{-2}$ m
60	9	- Variation de la $H_d$ en fonction du débit gazeux pour différents débits liquides et $H_s = 10 \cdot 10^{-2}$ m
60	10	- Variation de la perte de charge en fonction du débit gazeux pour différents débits liquides et une hauteur statique de $5 \cdot 10^{-2}$ m.
60	11	- Variation P en fonction de G pour différents L et $H_s = 7,5$ cm
60	12	- Variation P en fonction de G pour différents L et $H_s = 10$ cm
40	13	- Variation $H_d$ en fonction de G pour différents L et $H_s = 5$ cm
40	14	- Variation de $H_d$ en fonction de G pour différents L et $H_s = 7,5$ cm.
40	15	- Variation de $H_d$ en fonction de G pour différents L et $H_s = 10$ cm.
40	16	- Variation de $\Delta P$ en fonction de G pour différents L et $H_s = 5$ cm.
40	17	- Variation de $\Delta P$ en fonction de G pour différents L et $H_s = 7,5$ cm.
40	18	- Variation de $\Delta P$ en fonction de G pour différents L et $H_s = 10$ cm
60	19	- Variation de $\ln \Delta P$ en fonction de $\ln G$ pour différents débits liquides;

Support à 60% de vide Fig( • )



Support à 60% de vide , Fig( 9 )



$\Delta P(N/m^2)$

Support à 60% de vide

$$H_s = 5 \cdot 10^2 (m)$$

3918,8

2939,1

1959,4

979,7

- $L(kg/sm^2) = 27,195$
- $= 33,994$
- x  $= 40,793$
- ▲  $= 47,592$

0

25

50

75

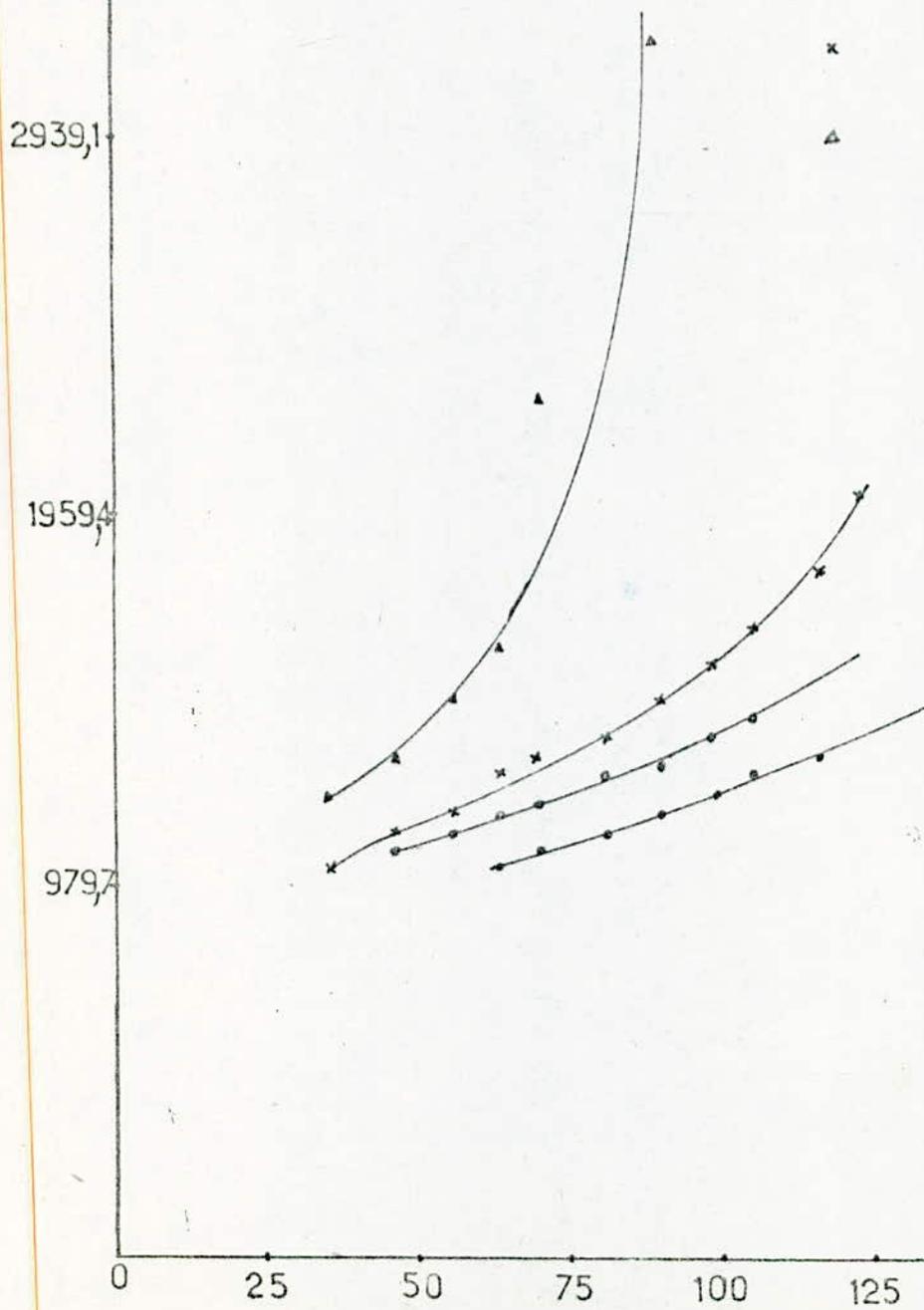
100

125

150

$G(kg/sm^2)10^2$

Figure ( 10 )



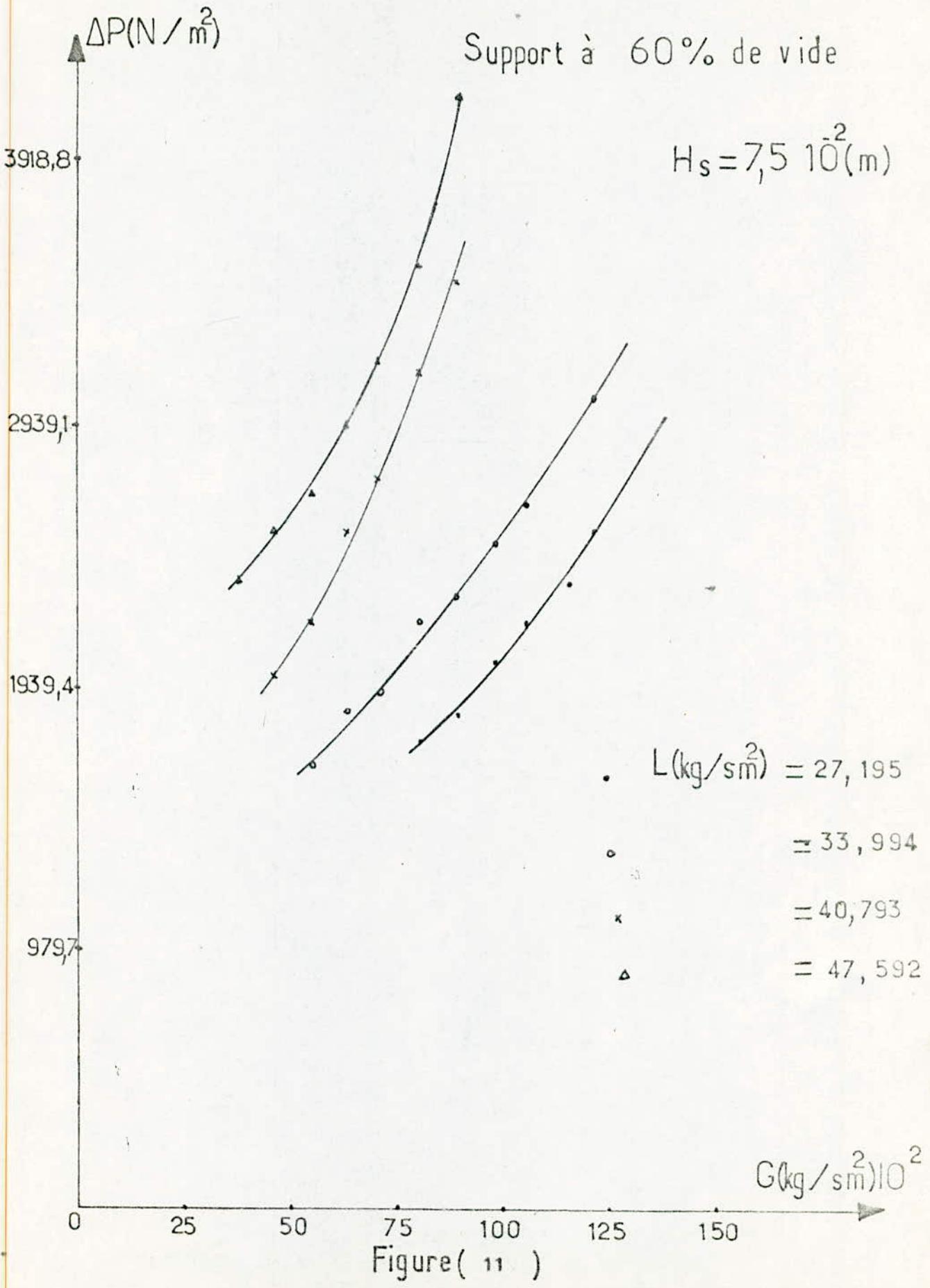
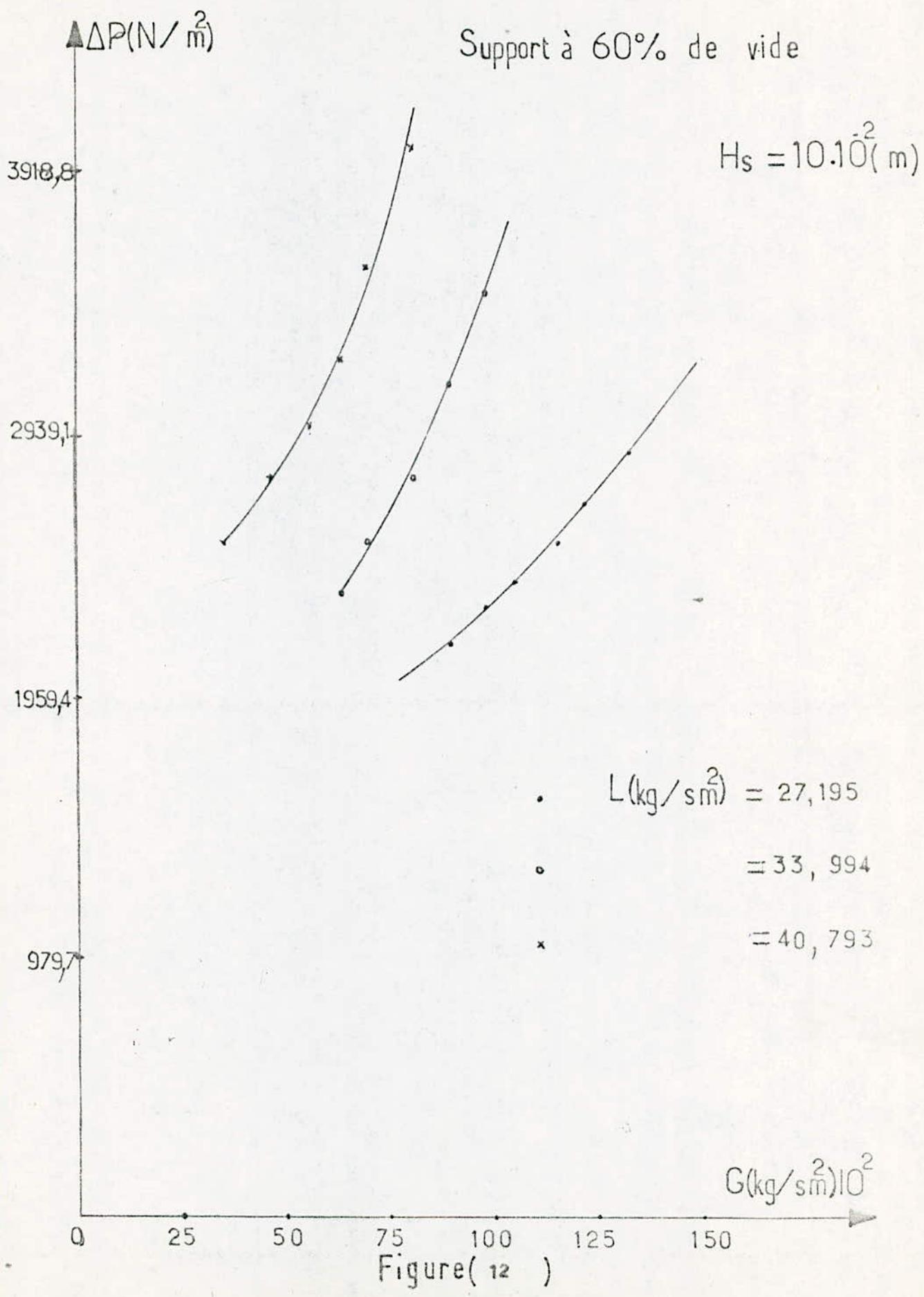


Figure ( 11 )

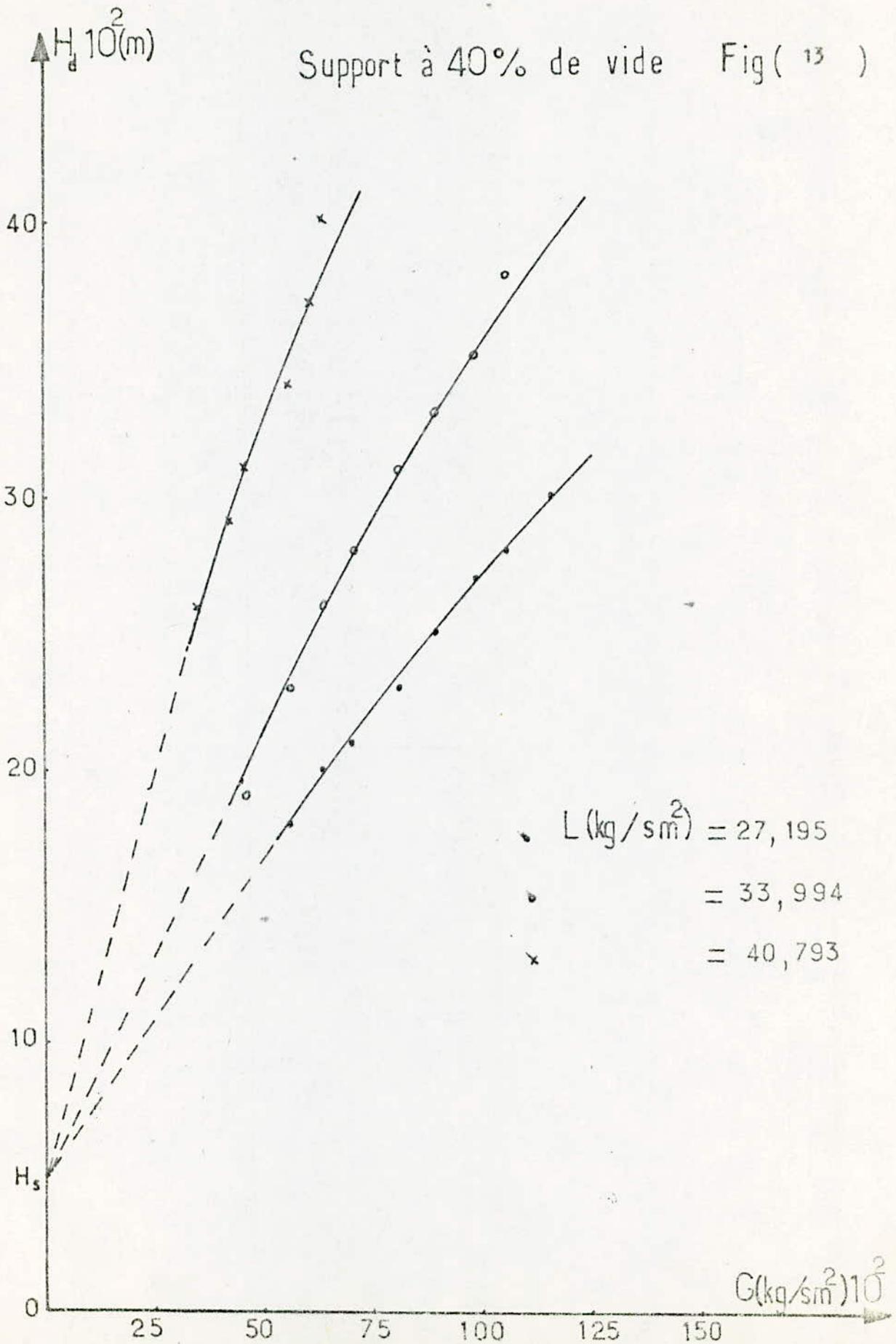
Support à 60% de vide

$H_s = 10 \cdot 10^{-2}$  (m)

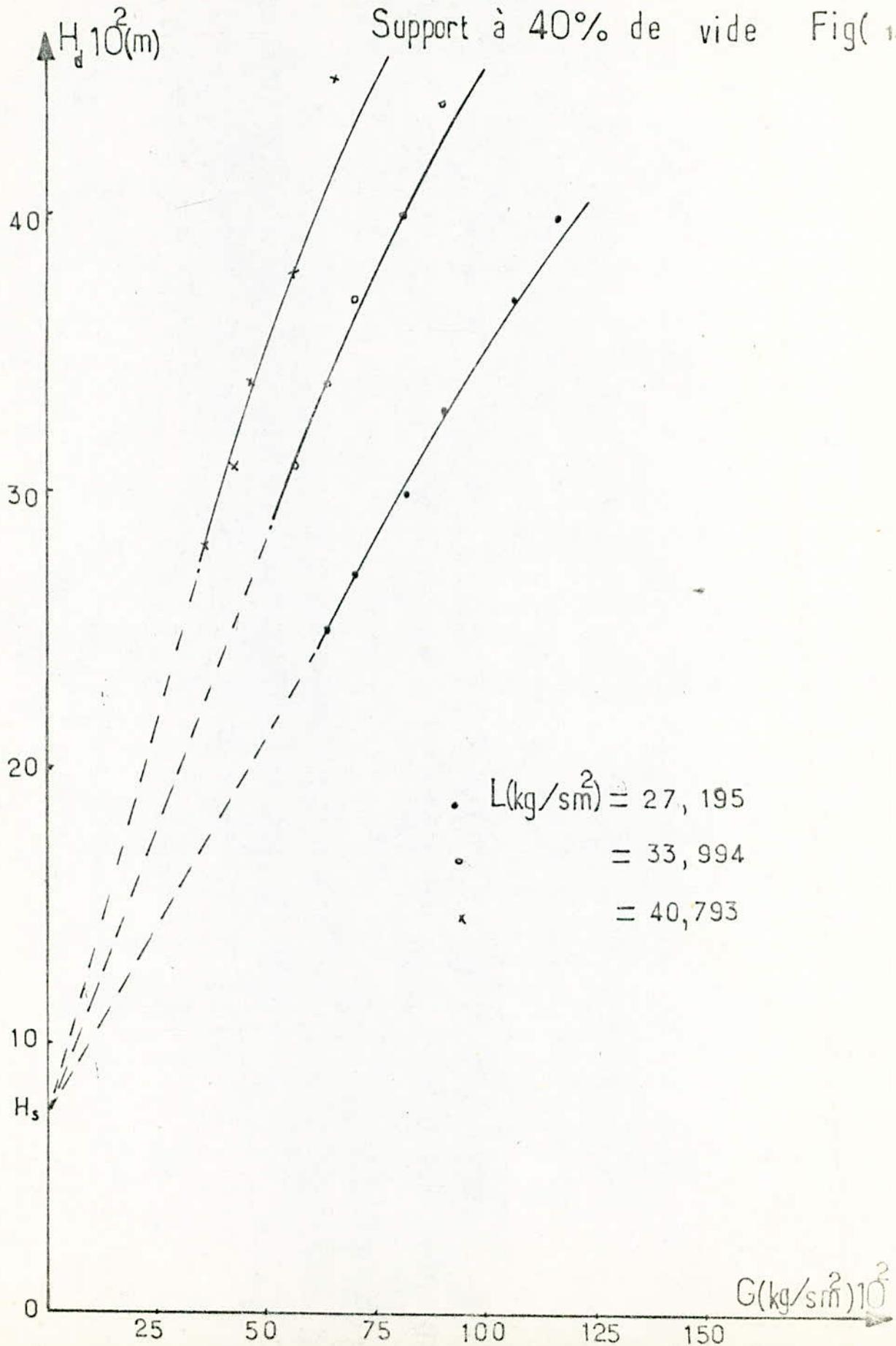


Figure( 12 )

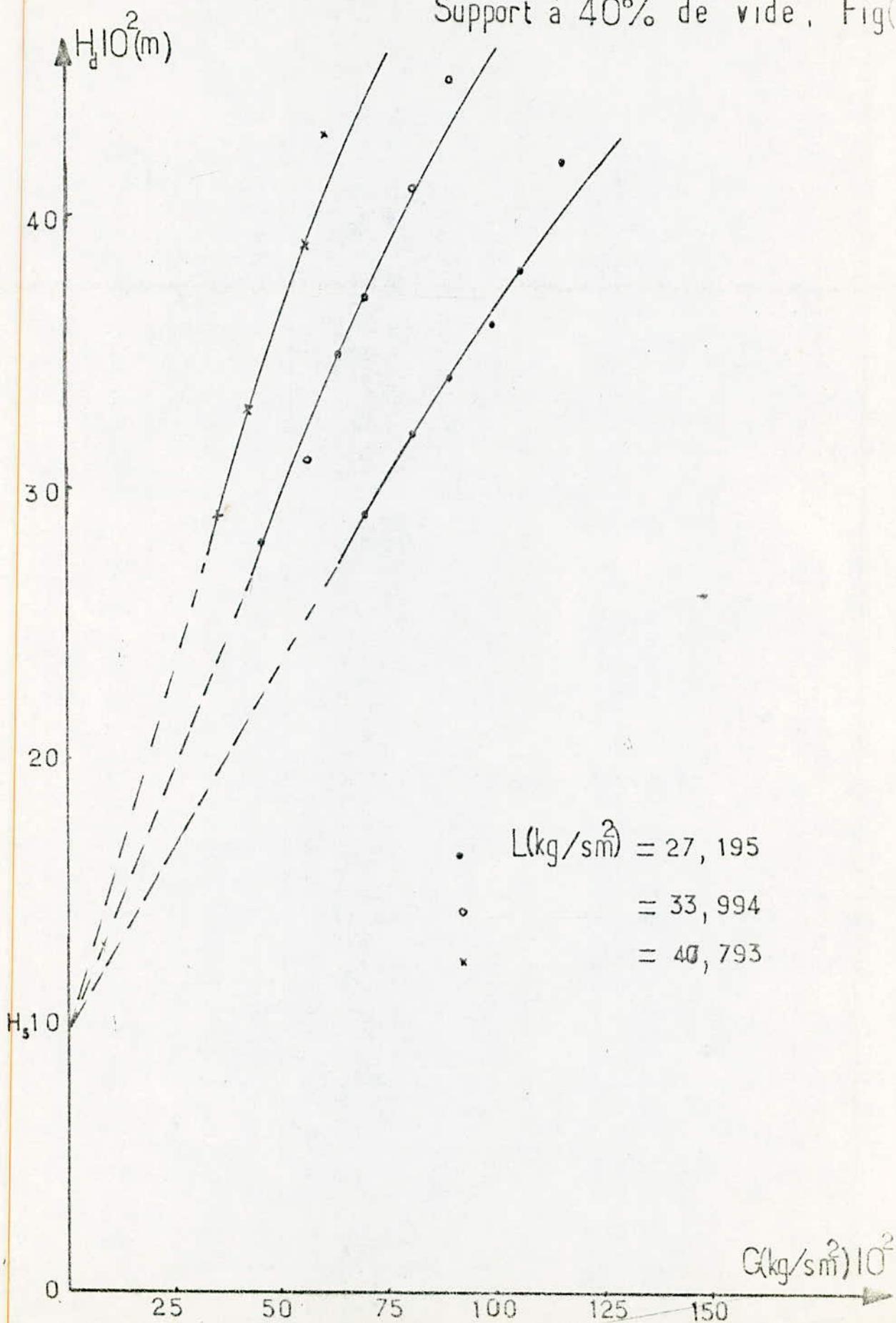
Support à 40% de vide Fig( 13 )



Support à 40% de vide Fig( 14 )



Support à 40% de vide, Fig( 15 )



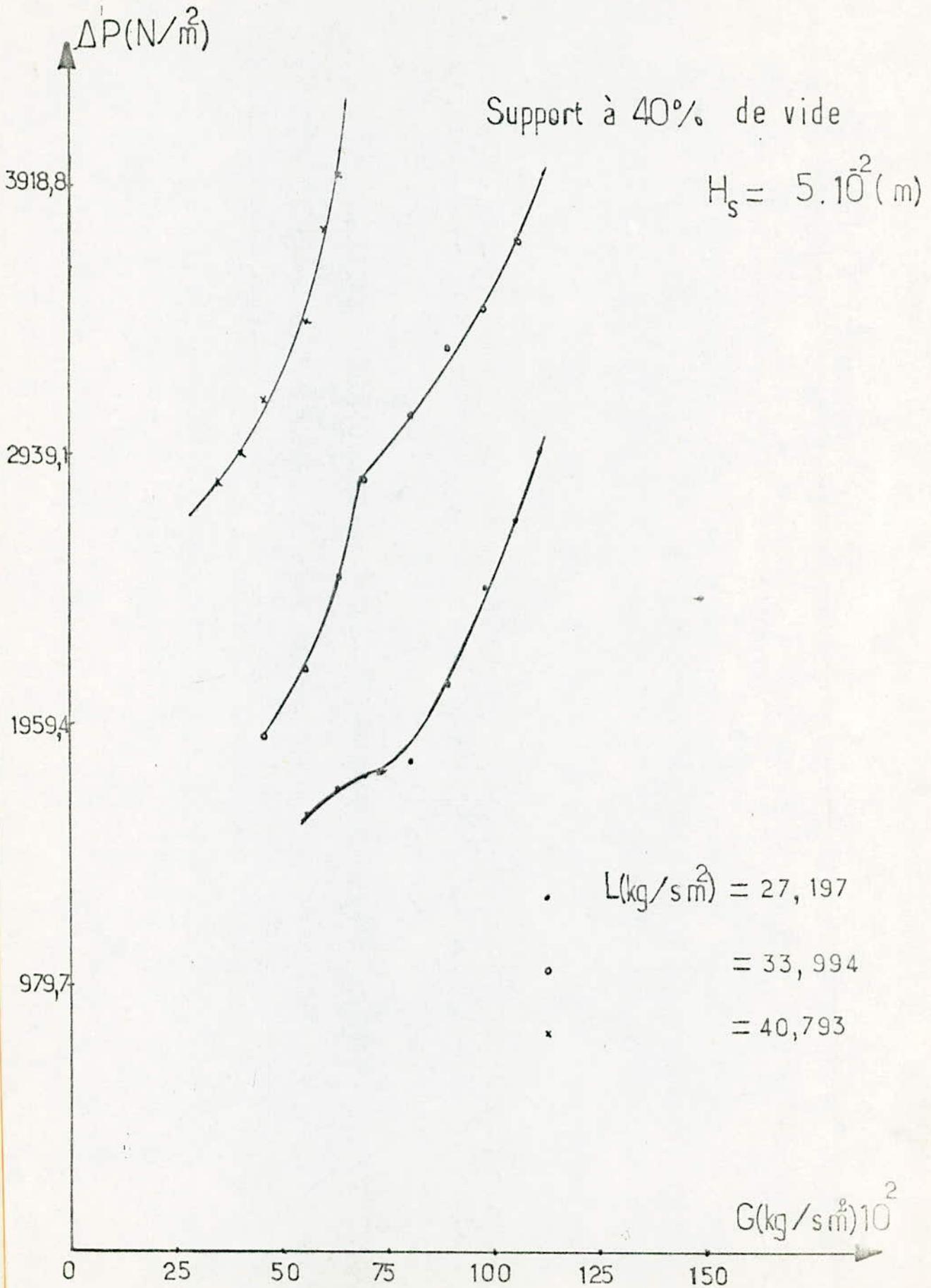
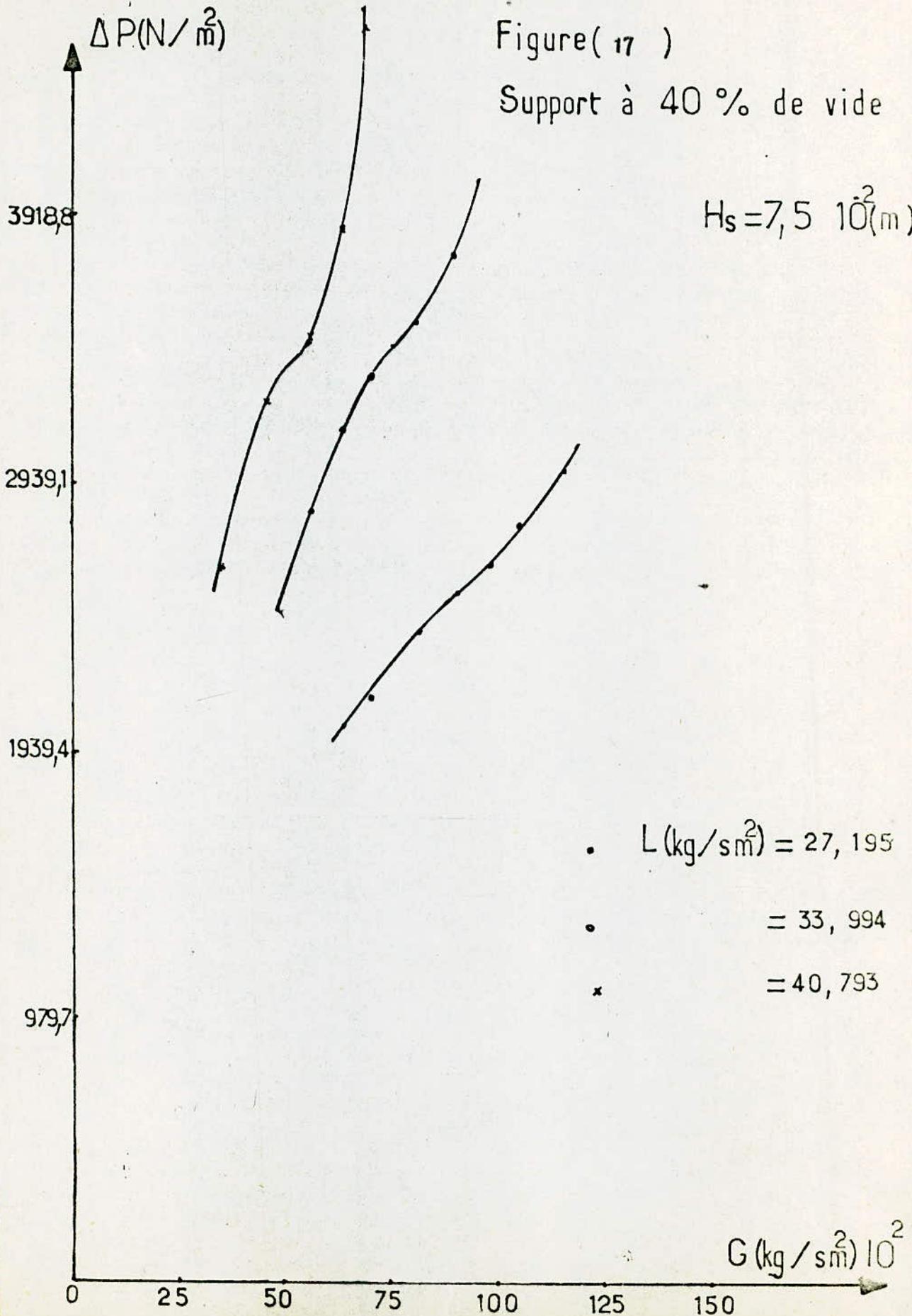


Figure ( 16 )

Figure( 17 )

Support à 40 % de vide

$H_s = 7,5 \cdot 10^2 (m)$



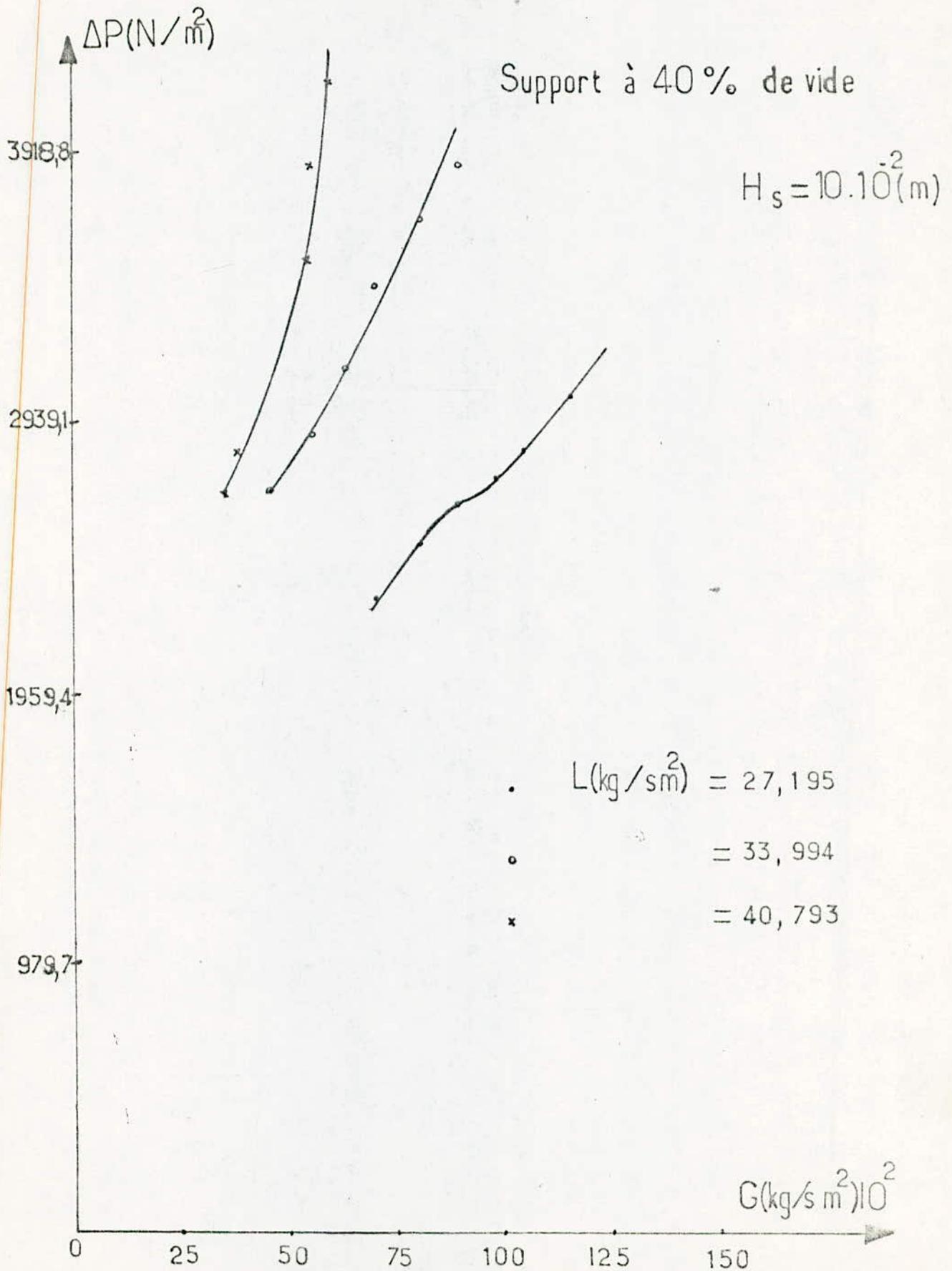
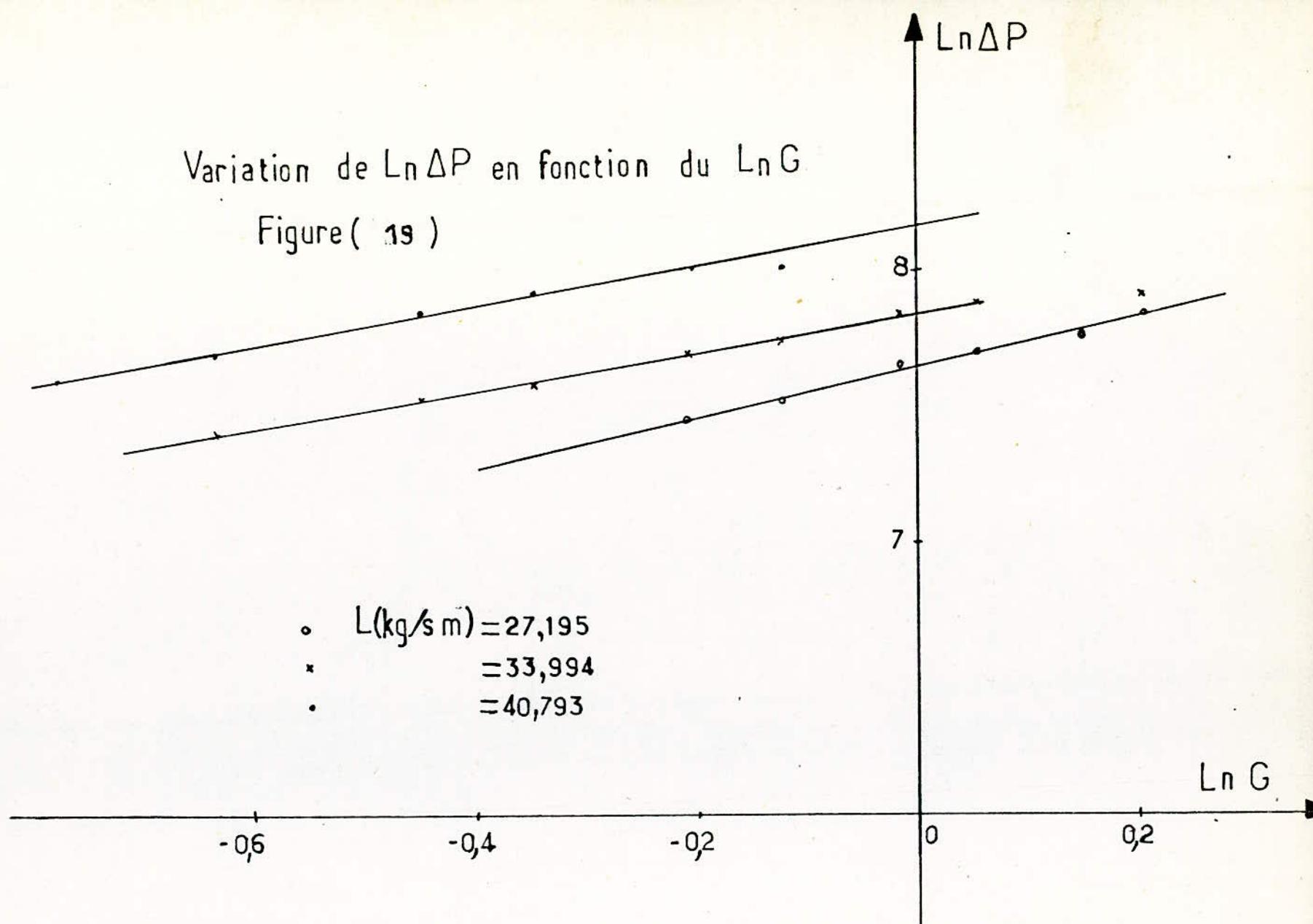


Figure ( 18 )

Variation de  $\text{Ln} \Delta P$  en fonction du  $\text{Ln} G$

Figure ( 19 )



### Conclusion Générale:

Cette brève étude hydrodynamique dans un appareil à balles flottantes de 51 mm de diamètre intérieur, un garnissage de 10 mm de diamètre et une masse volumique ( $\rho_s$ ) de 239,126 (kg/sm<sup>3</sup>), nous a permis de déterminer le domaine de variation de chaque paramètre susceptible d'influer sur le fonctionnement de notre appareil.

$$5.10^{-2} \ll H_s(m) \ll 10.10^{-2}$$

$$27,195 \ll L(\text{kg/sm}^2) \ll 40,793$$

$$37,274 \ll G(\text{kg/sm}^2).10^2 \ll 133,491$$

Nous avons remarqué un intervalle de bonne homogénéité des trois phases gaz-liquide-solide où la hauteur dynamique est très importante et la variation de la perte de charge est faible ce qui assurera un bon transfert de matière et de chaleur pour une consommation d'énergie relativement faible.

Cet intervalle est défini comme suit:

$$27,195 \ll L(\text{kg/sm}^2) \ll 40,793$$

$$50,10^{-2} \ll G(\text{kg/sm}^2) \ll 125.10^{-2}$$

$$5.10^{-2} \ll H_s(m) \ll 7,5.10^{-2}$$

Support de 60 % de vide

Nous avons donné les pertes de charge et les hauteurs dynamiques des écoulements monophasiques et diphasiques gaz-liquide, les résultats obtenus ont été comparés à ceux de la littérature.

Nous avons déduit des corrélations de calcul, l'une de la perte de pression et l'autre de la hauteur dynamique pour un support de 60 % de vide et une hauteur statique de 7,5 cm.

$$\Delta P = 115,735 \cdot L^{0,856} \cdot G^{0,324}$$

$$H_d = 0,017 \cdot L^{0,860} \cdot G^{0,658}$$

Conditions de validité :

$$1665,5 \leq \Delta P \text{ ( N/m}^2 \text{ )} \leq 4163,5$$

$$7,5 \cdot 10^{-2} \leq H_d \text{ ( m )} \leq 45 \cdot 10^{-2}$$

L: débit massique spécifique du liquide (kg/sm<sup>2</sup>).

G: débit massique spécifique du gaz (kg/sm<sup>2</sup>).

Des deux facteurs qui régissent l'homogénéité des trois phases ( gaz-liquide-solide), la hauteur statique du lit et le pourcentage de vide du support, il ressort nettement que le plus important est le pourcentage de vide; un support de 60 % de vide crée une bonne homogénéité d'ou une hauteur dynamique très importante ainsi qu'un bon coefficient de transfert de matière et de chaleur; un support de vide donne une mauvaise homogénéité et avec une consommation d'énergie assez grande, dans les mêmes conditions expérimentales.

Il est remarqué lors des expériences que la vitesse minimale de fluidisation pour un garnissage arrosé est très inférieure que celle pour un garnissage sec, ceci est dû à l'accroissement de la rétention du liquide qui va à son tour accroître la vitesse réelle à travers la colonne ainsi que la poussée d'ARCHIMEDE, ce qui entraîne une diminution de la masse volumique apparente.

## NOMENCLATURE

- $a_p$  : aire spécifique de particule  
 $A$  : section de particule  
 $d$  : diamètre de particule  
 $D$  : diamètre de la colonne  
 $f$  : coefficient de frottement  
 $g$  : accélération de pesanteur  
 $C$  : débit massique spécifique de gaz  
 $h$  : hauteur de la colonne  
 $H_d$  : hauteur dynamique du lit  
 $H_s$  : hauteur statique  
 $L$  : débit massique spécifique de liquide  
 $n$  : exposant de LEVA  
 $\Delta P$  : perte de charge  
 $R_e$  : nombre de Reynolds  
 $U$  : vitesse de gaz  
 $\rho_g$  : masse volumique du gaz  
 $\rho_s$  : masse volumique du <sup>solide</sup> liquide  
 $\epsilon$  : porosité  
 $\mu$  : viscosité d'air  
 $\phi$  : sphéricité

- ANNEXE

## Etalonnage de débitmètre de fluide

## 1-1- Etalonnage du débitmètre de liquide:

Le procédé d'étalonnage que nous adopté est le suivant;

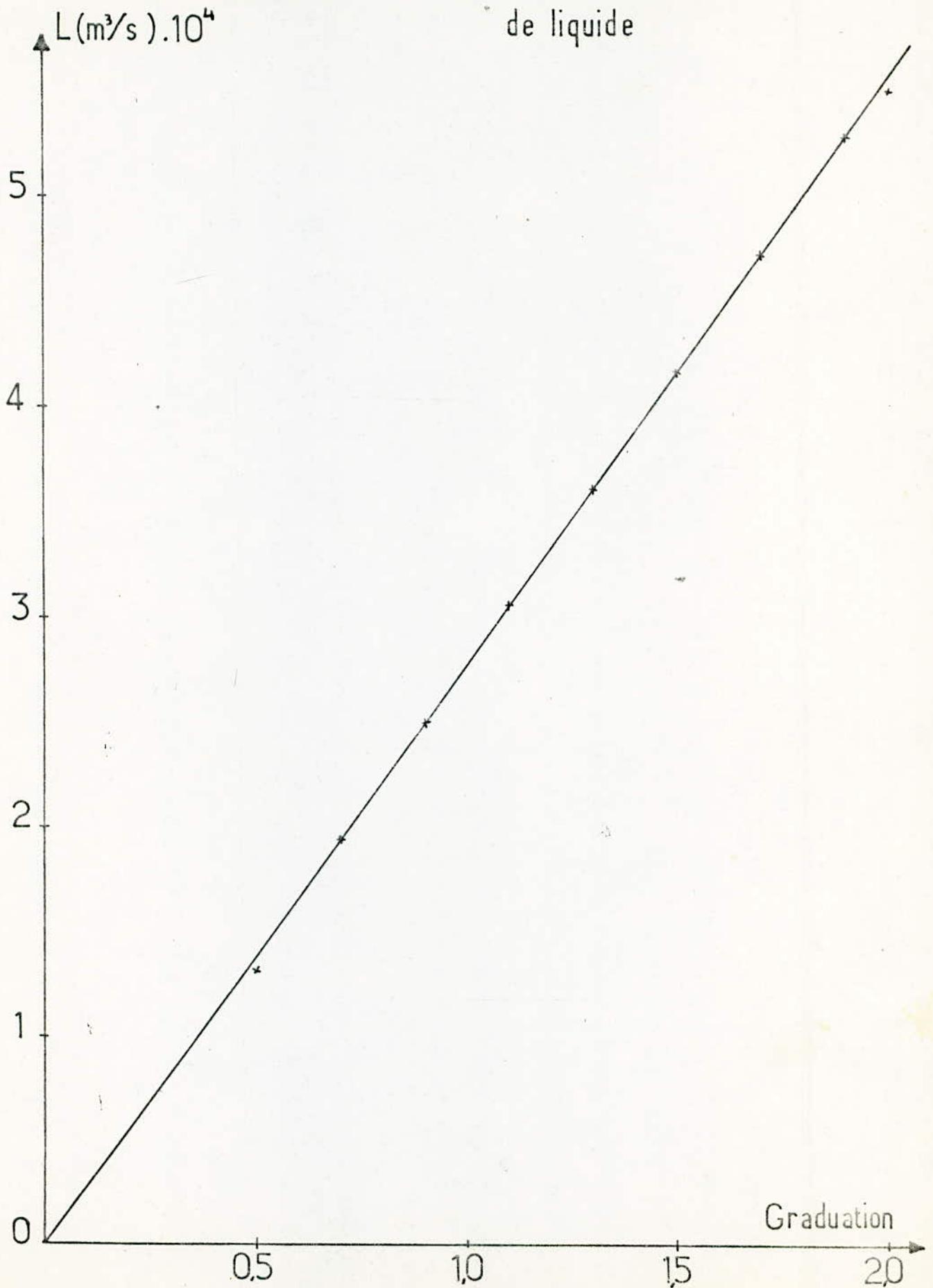
Nous fixons le flotteur sur une position et nous mesurons le volume de liquide recueilli pendant le temps  $t$ , le débit volumique est alors donné par

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

Les résultats d'étalonnage sont donnés dans le tableau ci-après et sont représentés graphiquement sur la figure(1-1).

Position du flotteur	V (m <sup>3</sup> ).10 <sup>4</sup>			t (s)			L(m <sup>3</sup> /s).10 <sup>4</sup>
0,5	2,28	2,38	2,27	1,65	1,63	1,67	1,39
0,7	4,40	3,60	3,90	2,30	1,84	2,00	1,94
0,9	4,30	4,50	4,10	1,72	1,80	1,80	2,50
1,1	5,00	5,30	4,80	1,35	1,73	1,56	3,06
1,3	5,40	5,00	5,40	1,50	1,38	1,50	3,61
1,5	5,20	5,00	5,40	1,38	1,50	1,50	4,17
1,7	7,00	6,30	6,80	1,46	1,34	1,45	4,72
1,9	6,40	6,40	6,40	1,21	1,20	1,21	5,28
2,0	6,00	6,00	5,80	1,08	1,08	1,07	5,56

Figure (1.1) Etalonnage du débitmètre  
de liquide



## 1-2- Etalonnage du débitmètre d'air:

Le procédé d'étalonnage est le suivant:

Nous fixons la position du flotteur et mesurons le volume  $V$  pendant le temps  $t$

Le débit est alors donné par .

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

Les résultats que nous avons obtenu sont regroupés dans le tableau suivant et représentés sur le figure(1-2).

Position du Flotteur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G(m^3/s) \cdot 10^4$	2,808	5,586	8,801	11,31	14,20	16,69	19,29	22,25	25,05	27,80

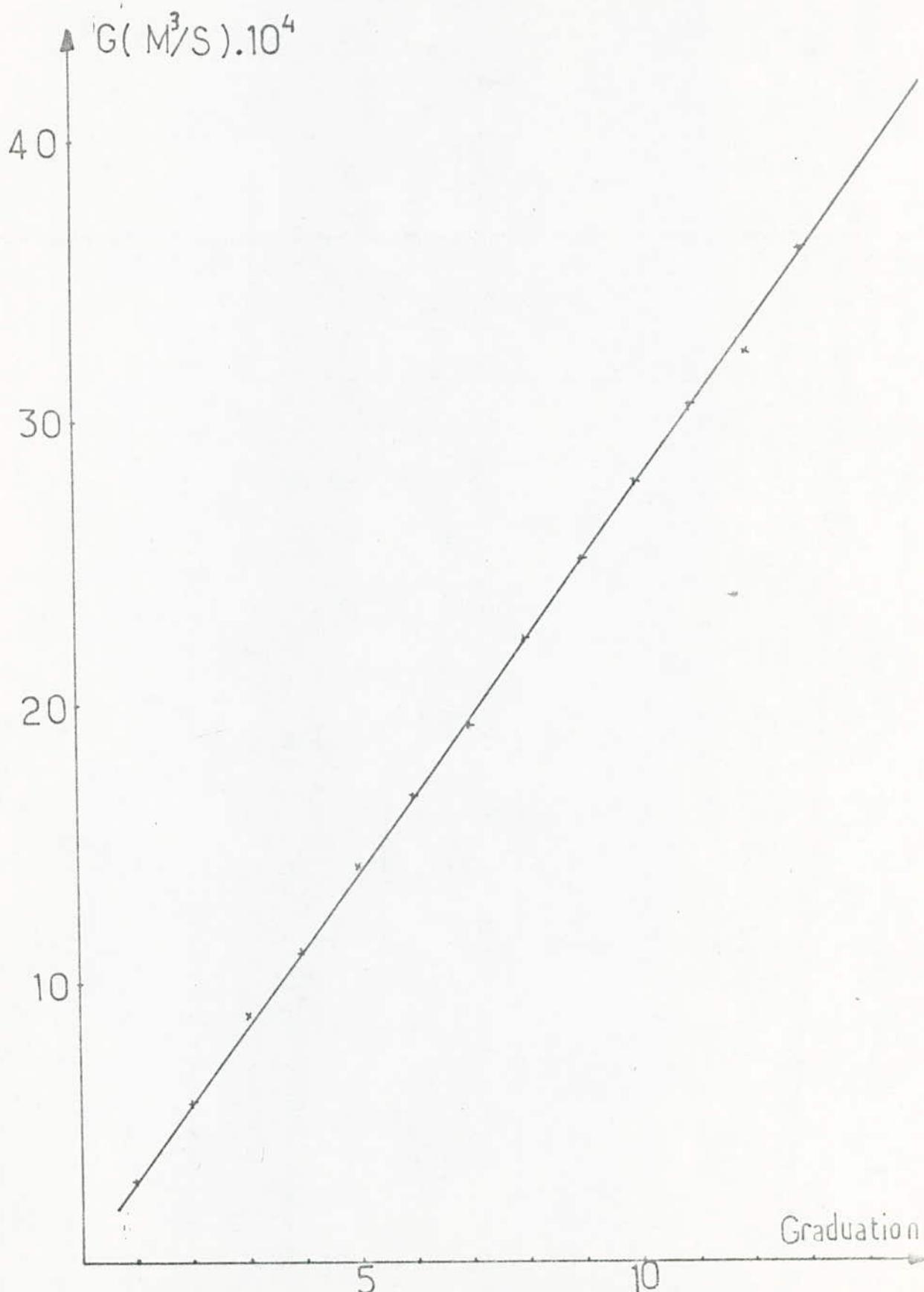


Figure (1.2) . Etalonnage du débitmètre d'air

Détermination de la porosité:

D'après la définition de la porosité . Si  $V_t$  le volume du lit et  $V_p$  celui des particules.

$$\epsilon_r = \frac{V_t - V_p}{V_t} = 1 - \frac{V_p}{V_t}$$

Avec

$$V_p = n \cdot V'_p = n \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3.$$

$$V_t = H_d \cdot \mathcal{L} = H_d \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$n$  : Le nombre de particules dans  $V_t$

$d$  : Le diamètre de particule

$V'_p$  : Le volume de particule

$\mathcal{L}$  : La section de la colonne

$D$  : Le diamètre de la colonne

$H_d$  : La hauteur dynamique

Pour

$$H_s = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$n = 116 \text{ Particules}$$

$$H_s = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$n = 174 \text{ Particules}$$

$$H_s = 10 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$n = 232 \text{ Particules}$$

$$D = 51 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

A.N

$$\epsilon_r = 1 - \frac{n \cdot 5,236}{H_d \cdot 2,043} \cdot 10^{-4}$$

# Resultats de LEVA

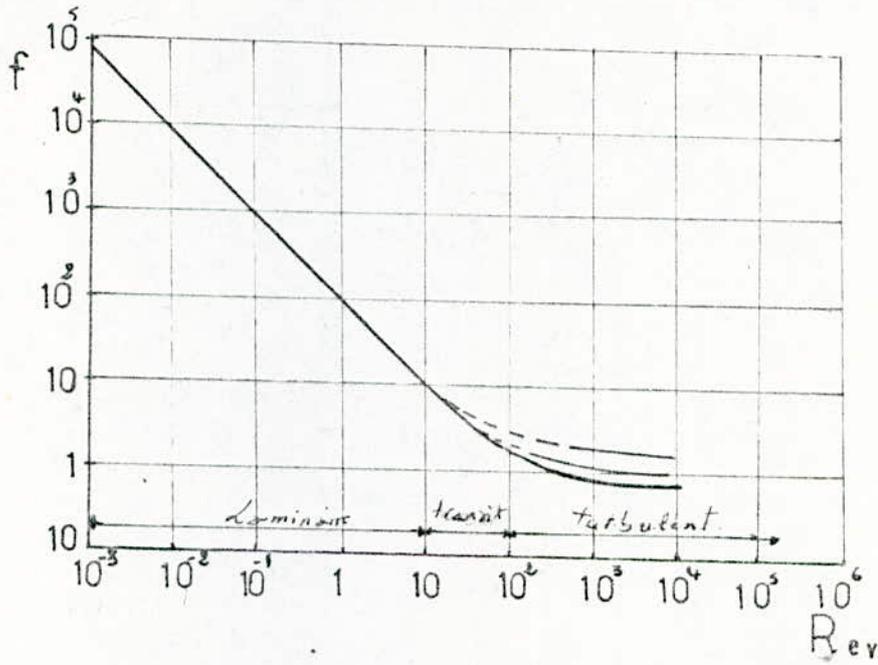


FIG (1-3)

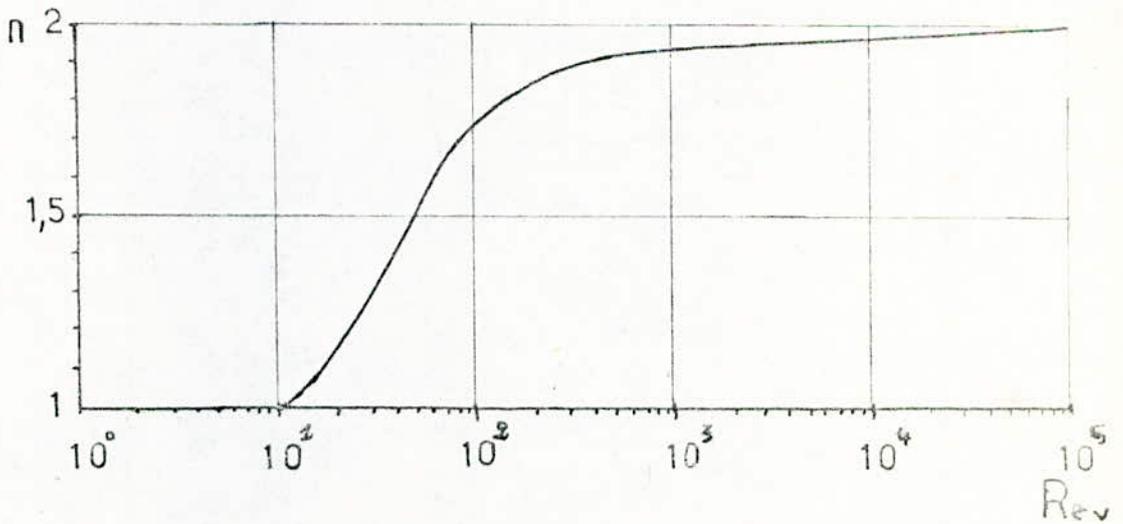


FIG (1-4)

% du vide du support	N° du tableau	Titre
60	4	- Variation de $H_d$ et $\Delta P$ en fonction du $G$ pour $L = 27,195 \text{ kg/sm}^2$ et $L = 33,994 \text{ kg/sm}^2$ à $H_s = 5 \text{ cm}$ .
60	5	- Variation de $H_d$ et $\Delta P$ en fonction du $G$ pour $L = 40,793$ et $L = 47,592 \text{ kg/sm}^2$ à $H_s = 5 \text{ cm}$ .
60	6	- Même variation que 4 mais avec une $H_s = 7,5 \text{ cm}$
60	7	- Même variation que 5 mais avec une $H_s = 7,5 \text{ cm}$
60	8	- Variation de $H_d$ et $\Delta P$ en fonction du $G$ pour $L = 27,195 \text{ kg/sm}^2$ avec une $H_s = 10 \text{ cm}$ .
60	9	- Variation de $H_d$ et $\Delta P$ en fonction du $G$ pour $L = 33,994 \text{ kg/sm}^2$ avec une $H_s = 10 \text{ cm}$ .
40	10	- Même variation que 8 mais avec une $H_s$ de $5 \text{ cm}$ .
40	11	- Même variation que 9 mais avec une $H_s$ de $5 \text{ cm}$ .
40	12	- Même variation que 8 mais avec une $H_s$ de $7,5 \text{ cm}$ .
40	13	- Même variation que 9 mais avec une $H_s$ de $7,5 \text{ cm}$
40	14	- Même variation que 8 mais avec une $H_s$ de $10 \text{ cm}$ .
40	15	- Même variation que 9 mais avec une $H_s$ de $10 \text{ cm}$ .

$T_{air} = 17^{\circ}C$   
 $T_{eau} = 20^{\circ}C$

$H_s = 5 \cdot 10^{-2} (m)$

Tableau ( 4 )  
 $P = 767 \text{ mm Hg}$

	$G (m^3/s) \cdot 10^4$		7,262	8,380	10,060	11,160	12,848	13,965	15,584	16,697	18,367
	$G (kg/sm^2) \cdot 10^2$		45,870	52,918	63,527	70,473	81,133	88,186	98,410	105,444	115,988
$L (m^3/s) = 5556 \cdot 10^5$	$L (kg/sm^2) = 27,195$	$\Delta P (cmE)$	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5
		$\Delta P (N/m^2) \cdot 10^2$	9,307	9,797	10,287	10,777	11,267	11,756	12,246	12,736	13,226
		$H_d (m) \cdot 10^2$	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$L (m^3/s) = 6944 \cdot 10^5$	$L (kg/sm^2) = 35,994$	$\Delta P (cmE)$	11	11,5	12	12,25	13	13,25	14	14,5	
		$\Delta P (N/m^2) \cdot 10^2$	10,777	11,267	11,756	12,001	12,736	12,981	13,716	14,206	
		$H_d (m) \cdot 10^2$	13	14	15	17	18	19	20	21	

T<sub>air</sub> = 17 °C  
T<sub>eau</sub> = 20 °C

H<sub>s</sub> = 5 10<sup>-2</sup> (m)

P = 767,2 mmHg

		G(m <sup>3</sup> /s) 10 <sup>4</sup>	5,586	7,262	8,380	10,060	11,160	12,848	13,965	15,58	16,697	18,367	19,480
		G(kg/sm <sup>2</sup> ) 10 <sup>2</sup>	35,274	45,870	52,918	63,527	70,473	81,133	88,186	98,410	105,438	115,438	123,011
L(m <sup>3</sup> /s) = 8,333 10 <sup>-5</sup>	L(kg/sm <sup>2</sup> ) = 40,793	ΔP (cmE)	10,5	11,5	12	13	13,5	14	15	16	17	18,5	20,5
		ΔP (N/m <sup>2</sup> ) 10 <sup>2</sup>	10,287	11,267	11,756	12,736	13,226	13,716	14,696	15,675	16,655	18,124	20,084
		H <sub>d</sub> (m) 10 <sup>2</sup>	12	14	16	17	18	20	21	22	23,5	25	27
L(m <sup>3</sup> /s) = 9,722 10 <sup>-5</sup>	L(kg/sm <sup>2</sup> ) = 47,552	ΔP (cmE)	12,5	13,5	15	16,5	23	32,5					
		ΔP (N/m <sup>2</sup> ) 10 <sup>2</sup>	12,246	13,226	14,696	16,165	22,533	31,840					
		H (m) 10 <sup>2</sup>	15	17	20	22	24	29					

Tableau( 5 )

$T_{air} = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $T_{eau} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $P = 772,3 \text{ mm Hg}$

$H_s = 7,5 \cdot 10^2 \text{ (m)}$

Tableau( 6 )

$L(\text{kg/s m}^2) = 33,994$			$G(\text{kg/s m})$ $10^2$	$L(\text{kg/s m}^2) = 27,195$			$G(\text{kg/s m}^2)$ $10^2$
$\Delta P$ ( $\text{N/m}^2$ ) $10^2$	$\Delta P$ (cmE)	$H_d \cdot 10^2$ (m)		$\Delta P$ ( $\text{N/m}^2$ ) $10^2$	$\Delta P$ (cmE)	$H_d \cdot 10^2$ (m)	
16,655	17	23	52,918	17,634	18	25	81,133
18,614	19	26	63,527	18,614	19	27	88,186
19,594	20	28	70,473	20,574	21	29	98,410
22,043	22,5	31	81,133	22,043	22,5	30	105,438
23,023	23,5	33	88,186	23,513	24	32	115,982
24,982	25,5	35	98,410	25,472	26	33	123,011
26,452	27	37	105,438				
30,371	31	40	123,011				

$T_{air} = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $T_{eau} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$H_s = 7,5 \cdot 10^2 \text{ (m)}$

Tableau ( 7 )  
 $P = 772,3 \text{ mmHg}$

$G(\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	6,111	7,262	8,380	10,060	11,160	12,848	13,965
$G(\text{kg}/\text{s m}^2) \cdot 10^2$	38,590	45,870	52,918	63,527	70,473	81,133	88,186

$L(\text{m}^3/\text{s}) = 8,333 \cdot 10^{-5}$	$L(\text{kg}/\text{s m}^2) = 40,793$	$\Delta P$ (cmE)	20,5	22,5	26	28	32	35,5	
		$\Delta P$ ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) $10^2$	20,084	22,043	25,472	27,432	31,350	34,779	
		$H_D$ (m) $10^2$	25	27	31	33	36	38	
$L(\text{m}^3/\text{s}) = 9,722 \cdot 10^{-5}$	$L(\text{kg}/\text{s m}^2) = 47,592$	$\Delta P$ (cmE)	24	26	27,5	30	32,5	36	42,5
		$\Delta P$ ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) $10^2$	23,513	25,472	26,942	29,391	31,840	35,263	41,637
		$H_P$ (m) $10^2$	29	29	32	36	39	42	45

$$H_s = 10 \cdot 10^{-2} \text{ (m)}$$

$$T_{\text{air}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{eau}} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 767 \text{ mm Hg}$$

G (m <sup>3</sup> /s)	G (kg/sm <sup>2</sup> )	L (m <sup>3</sup> /s) = 5,556 10 <sup>5</sup>		
		L (kg/sm <sup>2</sup> ) = 27,195		
10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> ) 10 <sup>-2</sup>	H <sub>d</sub> · 10 <sup>2</sup> (m)
11,160	70,473	22	21,553	31
12,848	81,133	23,5	23,023	33
13,965	88,186	24,5	24,003	35
15,584	98,410	26	25,472	37
16,697	105,438	27,5	26,942	39
18,367	115,982	29,5	28,901	41

Tableau ( 8 )

T<sub>air</sub> = 14,5°C

T<sub>eau</sub> = 20°C

$H_s = 10^{-2} \text{ (m)}$

P = 767 mm Hg

		G(m/s) $10^4$	7262	8 380	10 060	11 160	12 848	13 965	15 584
		G(kg/sm <sup>2</sup> ) $10^2$	45,870	52,918	63,527	70,473	81,133	88,186	98,410
L(m <sup>3</sup> /s) = 6,994 $10^{-5}$	L(kg/sm <sup>2</sup> ) = 33,994	$\Delta P$ (cmE)	20,5	22,5	24	26	28,5	32	35,5
		$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> ) $10^{-2}$	20,084	22,043	23,513	25,472	27,921	31,350	34,779
		H <sub>2</sub> (m) $10^2$	26	88	30	33	37	40	42
L(m <sup>3</sup> /s) 8,333 $10^{-5}$	L(kg/sm <sup>2</sup> ) = 40,793	$\Delta P$ (cmE)	28,5	30,5	33	36,5	41		
		$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> ) $10^{-2}$	27,921	29,881	32,330	35,759	40,167		
		H <sub>2</sub> (m) $10^2$	32	35	36	40	43		

Tableau( 9 )

$$H_s = 5,10 \text{ (m)}$$

$$T_{air} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{eau} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 758 \text{ mmHg}$$

$G(\text{kg}/\text{s m}^2)$	$G(\text{kg}/\text{s m}^2)$	$L(\text{m}^3/\text{s}) = 5,556 \cdot 10^{-5}$		
		$L(\text{kg}/\text{s m}^3) = 27,195$		
$10^4$	$10^2$	$\Delta P$ ( $\tau \text{ mE}$ )	$\Delta P$ ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) $10^{-2}$	$H_d \cdot 10^2$ (m)
8,380	52,918	16,5	16,165	18
10,060	63,527	17,5	17,145	20
11,160	70,473	18	17,635	21
12,848	81,133	18,5	18,124	23
13,956	88,186	21,5	21,064	25
15,584	98,410	25	24,493	27
16,797	105,438	27,5	26,942	28
18,367	115,982	30	29,391	30

Tableau( 10 )

$$T_{\text{air}} = 15^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{eau}} = 19^{\circ}\text{C}$$

$$P = 758 \text{ mmHg}$$

$$H_s = 5 \cdot 10^2 (\text{m})$$

$G(\text{kg}/\text{sm}^2)$ $10^2$	$L(\text{kg}/\text{sm}^2) = 33,994$			$G(\text{kg}/\text{sm}^2)$ $10^2$	$L(\text{kg}/\text{sm}^2) = 40,793$		
	$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) $10^{-2}$	$H_d$ $10^2$ (m)		$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) $10^{-2}$	$H_d$ $10^2$ (m)
45,870	19,5	19,104	20	35,274	29	28,411	26
52,918	22	21,553	23	42,3229	30	29,291	29
63,527	25,5	24,982	26	45,870	32	31,350	31
70,473	29	28,411	28	52,918	35	34,290	34
81,133	31,5	30,861	31	59,965	38,5	37,718	37
88,186	34	33,310	33	63,527	40,5	39,678	40
98,410	35,5	34,780	35				
105,438	38	37,229	38				

Tableau( 11 )

$$H_s = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ (m)}$$

$$T_{\text{air}} = 13,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{eau}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 772,3 \text{ mm Hg}$$

G (m <sup>3</sup> /s)	G (kg/sm <sup>2</sup> )	L (m <sup>3</sup> /s) = 5,556 · 10 <sup>-5</sup>		
		L (kg/sm <sup>2</sup> ) = 27,195		
10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	ΔP (cmE)	ΔP (N/m <sup>2</sup> ) 10 <sup>2</sup>	H <sub>d</sub> · 10 <sup>2</sup> (m)
10,060	63,527	21	20,574	25
11,160	70,478	22	21,553	27
12,848	81,133	24,5	24,003	30
13,965	88,186	26	25,472	33
15,584	99,410	27	26,452	35
16,687	105,438	28,5	27,921	37
18,337	115,982	30,5	29,90	40

Tableau ( 12 )

$$T_{air} = 13,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{eau} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 772,5 \text{ mm Hg}$$

$$H_s = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ (m)}$$

		$L(\text{kg/s}^m) = 33,994$					$L(\text{kg/s}^m) = 40,793$		
$G(\text{kg/s}^m)$ $10^2$	$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ ( $\text{N/m}^2$ ) $10^{-2}$	$H_d$ $10^2$ (m)	$G(\text{kg/s}^m)$ $10^2$	$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ ( $\text{N/m}^2$ ) $10^{-2}$	$H_d$ $10^2$ (m)		
52,918	29	28,411	31	35,274	27	26,452	28		
63,527	32	31,350	34	45,870	33	32,330	31		
70,473	34	33,310	37	52,918	35,5	34,779	34		
81,133	36	35,269	40	63,527	39,5	38,698	38		
88,186	38,5	37,718	44	70,473	47	46,046	45		

Tableau ( 13 )

$$H_s = 10 \cdot 10^{-2} \text{ (m)}$$

$$T_{\text{air}} = 14.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{eau}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 767 \text{ mmHg}$$

G(m <sup>3</sup> /s)	G(kg/sm <sup>2</sup> )	L(m <sup>3</sup> /s) = 5,556 · 10 <sup>-5</sup>		
		L(kg/sm <sup>2</sup> ) = 27,195		
10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	ΔP(cmE)	ΔP(N/m <sup>2</sup> )	H <sub>d</sub> 10 <sup>2</sup> (m)
13,965	88,186	23,5	23,023	29
15,584	98,410	25,5	24,982	32
16,687	105,438	27	26,452	34
18,367	115,982	28	27,432	36
19,480	123,011	29	28,411	38
21,150	133,555	31	30,371	42

Tableau ( 14)

$$H_s = 10 \cdot 10^2 \text{ (m)}$$

$$T_{\text{air}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{eau}} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 767 \text{ mmHg}$$

$G(\text{kg/s}^2)$ $10^2$	$L(\text{kg/s}^2) = 33,994$			$G(\text{kg/s}^2)$ $10^2$	$L(\text{kg/s}^2) = 40,793$		
	$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> ) $10^{-2}$	$H_d \cdot 10^2$ (m)		$\Delta P$ (cmE)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> ) $10^{-2}$	$H_d \cdot 10^2$ (m)
45,870	27,5	26,42	28	35,274	27,5	26,942	29
52,918	29,5	28,901	31	42,329	29	28,411	33
63,527	32	31,350	35	49,384	36	35,270	35
70,473	35	34,290	37	52,918	39,5	38,698	39
81,133	37,5	36,739	41	59,965	42,5	41,637	43
88,186	39,5	38,698	45				

Tableau ( 15 )

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 )- M. WOZNIAK and K. OSTERGAARD.  
Chem . Eng ; Sci 28.167(1973)
- 2 )- J. REMILLIEUX.  
A.T.I.P (19)94-96(1965)
- 3 )- H.R. DOUGLAS, I.W.A. SNIDER and G.H. TOMLINSON.  
Chem . Eng . 45.392(1977)
- 4 )- M. KITO, Y. KAYANIA, T. SAKAI and S. SUGIYAMA.  
Int . Chem . Eng 16(4)710(1976)
- 5 )- P. WUTHIER.  
Raffinage et Génie Chimique - Tome - 1339(1972)  
I.F.P (1972)
- 6 )- D. KUNII, and O. LEVENSPIEL.  
Fluidization Engineering 73(1969)  
New York (1969)
- 7 )- W. YAICI  
Cours Hydrodynamique-Fen 112-  
Deuxième Semestre 1985/86
- 8 )- M. SERWINSKI  
Zosadyinzyierii Chemicznes 103(1982)  
W.N.T Varsovie
- 9 )- K. WINNACKER.  
Génie Chimique  
Edition Eyrolles (1963)
- 10)- G. ARDITTI.  
Technologie Chimique Industrielle - Tome I -  
Edition Eyrolles (1965)
- 11)- J. AMANOWICZ  
Projet de Fin d'Etudes - étudié par ARRAR.Z  
E.N.P.A — 1982



