

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

23/88

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

lex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Etude de Transfert de Matière
dans une Colonne à Garnissage
Mobile

Proposé Par :
M.A.CIESLAK

Etudié par :
M.M.BOUFELLAH

Dirigé par :
M.A.CIESLAK

PROMOTION : JUIN 1988



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Etude de Transfert de Matière
dans une Colonne à Garnissage
Mobile

Proposé Par :
M.A.CIESLAK

Etudié par :
M.M.BOUFELLAH

Dirigé par :
M.A.CIESLAK

PROMOTION : JUIN 1988

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie-chimique

Promoteur : M . A . CIESLAK

Élève ingénieur : M . M . BOUFELLAH

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

الموضوع : دراسة انتشار المادة داخل
برج محشو بكرات صلبة
متحركة.

الملخص : تتلخص هذه الدراسة في
إيجاد ثوابت انتشار المادة في الحالة
الغازية وتحليل تأثير المتغيرات العاملة على
انتشار المادة من سائل إلى غاز داخل برج
عمودي في سريان مضاد.

Sujet : Etude de transfert de matière dans une colonne à garnissage mobil

Résumé : Notre travail consiste à déterminer les coefficients de transfert de
matière volumétrique en phase gazeuse et d'analyser l'influence des
paramètres opératoires sur l'échange de matière dans le cas du
procédus d'humidification des gaz . (système : air - eau)

Subject : Mass transfer study in a turbulent contact absorber .

Abstract : Our work consists of determining the volumetric mass transfer
coefficients in gas phase and analyse the effect of operating
variables on liquide - gas mass transfer in packed column in counter-
current three phase fluidized bed . (system : air - water)

DEDICACES

Je dédie cette modeste mémoire .

A mon père .

A ma mère .

A toute ma famille .

A mes amis et à tout ceux qui me sont chères .

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur monsieur A.CIESLAK qui m'a dirigé et suivi au cours de l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à la présidente du jury.

Melle W.YAICI

Maitre assistante

Aux membres du jury.

Monsieur Y.BOUMGHAR

Maitre assistant

Monsieur M.LOUNES

Maitre assistant

Monsieur A.CIESLAK

Maitre de conférence

Que tous ceux qui ont participés de près ou de loin à ce travail puissent trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

INTRODUCTION :

1

PARTIE THEORIQUE :

Chapitre : 1 - Transfert de matière

1-1: Transfert de matiere entre les phases gazeuse
et liquide. 3

1-2: Mecanisme de transfert de matiere. 5

1-2-1: Theorie du double film. 5

1-2-2: Theorie de penetration. 5

1-2-3: Theorie de renouvellement de la surface. 6

Chapitre : 2 - Diffusion

2-1: Généralités sur les principes de diffusion. 7

2-2: Role de la diffusion dans le transfert de masse. 7

2-3: Théorie de la diffusion. 8

2-4: Comparaison de la diffusion et du transfert de chaleur. 8

2-5: Diffusion dans les gaz. 9

2-6: Diffusion en régime turbulent. 10

2-7: Ecoulement à l'intérieur des conduites 10

Chapitre : 3 - Humidification

3-1: Opération d'humidification. 12

3-2: Theorie du processus d'humidification. 12

3-3: Mecanisme de l'interaction gaz-liquide. 12

Chapitre : 4 - Appareils de mise en contact

4-1: Appareils de mise en contact gaz-liquide pour absorption. 14

4-1-1: Appareils à balles flottantes. 15

Chapitre : 5 - L'humidité

5-1: Caractéristique de l'air humide. 17

5-1-1: L'air et l'humidité. 17

5-1-2: Quantité de vapeur d'eau.	17
5-1-3: Humidité relative.	17
5-1-4: Humidité absolue.	18
5-1-5: Point de rosée.	18
5-2: Diagramme de l'air humide.	



PARTIE EXPERIMENTALE : (1)

Chapitre : 1 - Description de l'appareillage utilisé.	
1-1: La colonne.	20
1-1-1 :Support de garnissage .	20
1-1-2: Corps de remplissage	20
1-2: Appareillage de réglage et de mesure.	20
1-2-1: Mesure de débit de gaz.	20
1-2-2: Mesure de débit liquide.	20
M1-2-3: Mesure de perte de pression.	20
1-2-4: Mesure de l'humidité relative.	20
1-2-5: Schéma de la colonne.	21
Chapitre : 2 - Etalonnage des appareils de mesures	
2-1: Etalonnage du débitmètre de liquide.	24
2-2: Etalonnage du débitmètre de gaz.	24
Chapitre : 3 - Etude hydrodynamique	
3-1: Mode opératoire	28
3-2: Conditions expérimentales	28
3-3: Interprétation des courbes	39
3-4: Conclusion	40

PARTIE EXPERIMENTALE : (2)

Chapitre : 1 -	
1-1: Mode opératoire	41

Chapitre : 2 -

 2-1:

Chapitre : 2

2-1: Essais de transfert de matière.

2-2: Allures des courbes

2-3: Conclusion

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

42

51

52

ANNEXE :

1) Psychrometre d'ASSMANN

53

2) Diagramme d'humidité pour le psychrometre d'ASSMANN.

54

3) Détermination de la porosité.

55

4) Tableaux des valeurs.

56-75

5) Nomenclature.

76

6) Bibliographie.

78

INTRODUCTION

L'objet du génie-chimique est la détermination de l'agencement , du dimensionnement et des conditions opératoires des appareils de l'industrie chimique , au sens le plus large , dans le but d'atteindre des performances requises .

Un très grand nombre de configurations permettent de réaliser ces performances .

Le choix entre ces configurations est conduit par la recherche du moindre cout .

Le transfert de matière qui est une des opérations importante du génie - chimique sera appliqué à la détermination des couples : géométrie de l'appareil , conditions opératoires (c'est à dire consommation d'énergie) , qui permettent d'assurer que les performances requises seront atteintes .

Cette dualité est transposable dans le domaine économique et les deux parties correspondent respectivement , en simplifiant à l'excès , aux investissement et aux frais de fonctionnement .

L'étude de transfert de matière dans les opérations unitaires , repose plus encore sur des modèles et des analogies entre les modèles suivants .

- Modèles d'écoulements d'abord , différent parfois de ceux de la mécanique des fluides , ceux-ci visent surtout à prévoir les pertes de charges ceux-là surtout à prévoir le transport des solutés et de la chaleur .

- Modèles de transfert de matière et de chaleur combinés aux modes d'écoulement .

Le transfert de matière , peut-être réalisé dans une grande variété d'équipement

On cherche toujours des contacteurs d'échange de masse plus performant , plus économique et qui donnent de bons coefficients d'échange de masse et de chaleur ,

Parmi ces contacteurs on distingue les appareils à balles flottantes dont les avantages sont :

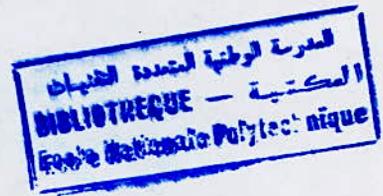
- L'important transfert de masse et de chaleur entre les deux fluides en comparaison avec les autres modes de contact .

- L'état isotherme de la colonne , permettant un contact du processus obtenu à l'aide du mélangeage des particules solides .

- Il est utilisable pour des débits de gaz et de liquide plus élevés que pour des colonnes à garnissage .

Le travail qui nous a été proposé consistait :

En la détermination des coefficients de transfert de masse en phase gazeuse , et l'analyse de l'influence des paramètres opératoires sur l'échange de matière dans le cas du processus d'humidification des gaz . (Système : air - eau)



PARTIE

THEORIQUE

CHAPITRE : 1

1 - 1 TRANSFERT DE MATIÈRE ENTRE LES PHASES GAZEUSE ET LIQUIDE

Dans plusieurs applications de transfert de matière, les molécules sont transférées d'une phase à une autre à travers une couche limite.

La vitesse de transfert de matière entre deux phases dépend des propriétés physiques des deux phases, de la différence de concentration, de l'aire interfaciale, ainsi que du degré de turbulence.

Les systèmes de transfert de matière gaz - liquide sont rencontrés dans l'industrie, comme au laboratoire.

Un grand nombre d'opérations de transfert de matière entre les phases gazeuse et liquide sont distinctes, soit parce que les modes opératoires sont différents, soit en raison de la nature même des phases en présence.

On rencontre plusieurs systèmes de transfert de matière gaz - liquide parmi lesquels on distingue :

- La distillation, l'absorption, l'évaporation, le séchage, l'humidification, la déshumidification etc ...

L'équipement utilisé pour le contact gaz - liquide est basé sur la combinaison des principes opératoires des trois catégories suivantes :

Mode d'écoulement

- Contre - courant, co - courant, courants - croisés.

Mécanisme de transfert

- Différentiel

- Integral

Phase en turbulence

- Gaz

- Liquide

La combinaison de ces caractéristiques utilisés dans différents types de processus sont indiqués dans le tableau suivant. (7)

désignation de l'équipement	mode d'écoulement	mécanisme	phase en turbulence	procédés d'applications
colonne à garnissage	contre-courant co - courant courants-croisés	différentiel	gaz	absorption , rectification , humidification etc .
colonne à plateau	contre - courant courants-croisés	integral	liquide	absorption, rectifica- tion, humidification etc...
colonne à film tombant	contre - courant co - courant	différentiel	liquide et / ou gaz	absorption rectification
système d'injection	co - courant courants-croisés	différentiel	gaz	absorption , séchage humidification
échangeur de chaleur	co - courant contre-courant	différentiel	gaz	évaporation dephlegmation
mélangeur	mélange total	integral	liquide	absorption
mélangeur linéaire	co - courant	différentiel	gaz	absorption

1-2: Mécanisme de transfert de matière .

Plusieurs phénomènes en génie - chimique impliquent le transfert de matière entre deux phases , différents mécanismes ont été proposés pour décrire les conditions au voisinage de l'interface .

1-2 Théorie du double film :

Cette théorie développée par LEWIS et WHITMAN suppose que la turbulence dans les deux phases , est loin de l'interface , et que la résistance au transfert prend naissance dans deux films fictifs .

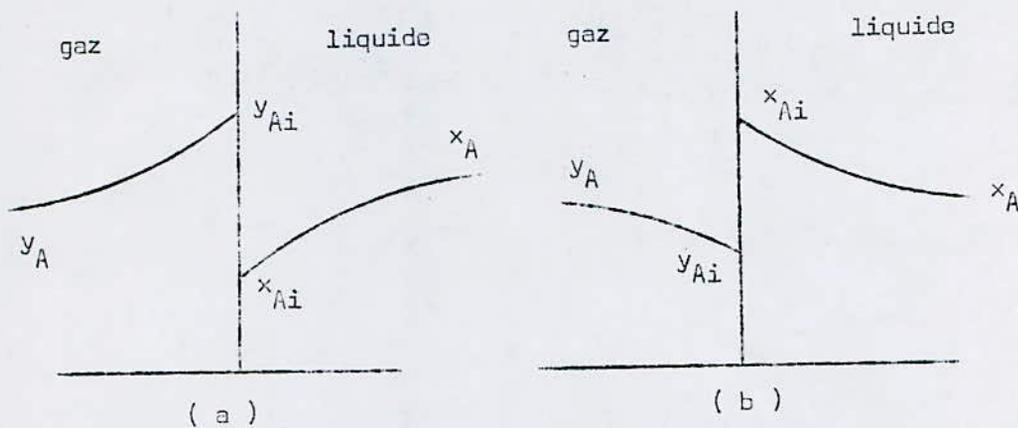


fig . 1 : gradients de concentration près de l'interface gaz - liquide .

a) distillation

b) absorption des gaz solubles

Dans la théorie du double film la vitesse de transfert à l'interface reste égale à la vitesse de transfert à travers l'interface .

$$r = kx \cdot (x_A - x_{Ai}) \quad (1)$$

$$r = ky \cdot (y_{Ai} - y_A) \quad (2)$$

1-2-3 Théorie de pénétration .

Le travail de HIGBIE (1935), fournit les fondations de la théorie de pénétration et suggère que le processus de transfert est attribué au matériaux frais conduits par les tourbillons à l'interface où le processus de transition prend place pour des périodes fixes .

1-2-2: Théorie de renouvellement de la surface .

DANCKWERTS a modifié la théorie de pénétration en considérant que le temps de séjour à l'interface n'est pas le même pour toutes les molécules .

TOOR et MARCHELLO ont proposés une autre théorie plus générale et considère que la résistance de transfert est assimilée à une couche à l'interface .

CHAPITRE 2

2-1: GENERALITES SUR LES PRINCIPES DE DIFFUSION .

La diffusion représente le mouvement , sous l'effet d'une stimulation physique quelconque d'une composante individuelle à travers un mélange .

La cause la plus répandue de la diffusion est un gradient de concentration de la composante sous diffusion . Un gradient de concentration a tendance à diriger la composante dans un sens tel que les concentrations s'en trouvent égalisés et que le gradient s'en trouvent éliminé .

Lorsqu'on maintient le gradient par le fait de fournir en continu , la composante sous diffusion à l'extrémité de faible concentration , l'écoulement de la composante sous diffusion devient continu .

C'est ce mouvement que l'on exploite dans les opérations de transfert de masse . Bien que la cause ordinaire de la diffusion soit un gradient de concentration , une diffusion peut aussi provenir soit d'un gradient de pression , soit d'un gradient de température appliqué sur l'ensemble du mélange .

La diffusion ne se limite pas à un transfert moléculaire à travers des couches stagnante de solide ou de liquide .

La diffusion procède dans les phases fluides par un mélange physique et par les tourbillons de l'écoulement turbulent , tout comme dans un fluide l'écoulement de la chaleur peut procéder par convection .

2 - 2: Rôle de la diffusion dans le transfert de masse .

Dans toutes les opérations de transfert de masse , il se produit une diffusion au cours d'au moins une phase et souvent dans les deux phases .

Dans le cas de l'absorption gazeuse , le soluté se diffuse à travers la phase gazeuse vers l'aire de contact entre les phases et à partir de cette dernière à travers la phase liquide .

Dans le cas du séchage , de l'eau sous forme de liquide se diffuse à travers le solide et se diffuse sous forme de vapeur jusque dans le gaz .

2-3: Théorie de la diffusion

Diffusion moléculaire : loi de FICK .

Une diffusion peut soit ne résulter que d'une action moléculaire , analogue à une conduction pure dans un procédé de transfert de chaleur , soit d'une association d'actions moléculaire et turbulente analogue au phénomène combiné de conduction et de convection .

Diffusion moléculaire seule .

$$\frac{N_{OA}}{S} = - D_{mA} \frac{dY_A}{db_x} \quad (3)$$

D_{mA} : diffusivité de la composante A ($L^2 \cdot T^{-1}$)

b : distance jusqu'à la frontière de la phase , prise dans le sens de la diffusion (L) .

Y_A : fraction molaire de la composante A

S : aire perpendiculaire à la direction du transfert de masse .

Pour la composante B on aura : $\frac{N_{OB}}{S} = - D_{mB} \cdot \frac{dY_B}{db} \quad (4)$

Dans un système à deux composantes dans lequel l'ensemble de la phase reste

immobile : $N_{OA} = - N_{OB} \quad (5)$

2-4: Comparaison de la diffusion et du transfert de chaleur .

Plusieurs analogies existent entre l'écoulement de chaleur et la diffusion .

Dans le transfert de chaleur un gradient de température est la force conductrice , tandis que dans la diffusion la force est un gradient de concentration .

Dans chacun des deux cas , le flux est directement proportionnel au gradient .

Dans la nature matérielle de la diffusion on a trois types de situations .

1 - Seulement un composé A du mélange est transféré à travers l'interface et

l'écoulement total est le même que l'écoulement de A .

L'absorption d'un composé unique d'un gaz dans un liquide est un exemple de ce type .

2 - La diffusion d'un composé A dans un mélange est équilibré par un écoulement molaire égal et opposé du composé B .

C'est généralement le cas de la distillation .

3 - La diffusion de A et B ont des directions opposés .

Cette situation se produit souvent en diffusion des espèces chimiquement réactives à travers une surface catalytique .

2-5: Diffusion dans les gaz :

Les valeurs de D_v pour la diffusion de certains gaz dans l'air à 0° C et 1 Atm. sont données par les tableaux .

A pression supérieur à 5 Atm. D_v peut-être considéré comme indépendante de la concentration .

Les diffusivités dans les gaz peuvent - être calculées avec une précision considérable à partir de la théorie cinétique .

Les corrélations théoriques ont été modifiées à la lumière des informations expérimentales qui donnent l'équation semi - empirique .

$$D_v = \frac{0,01498 \cdot T^{1,81} \cdot \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0,5}}{P \cdot (T_{CA} \cdot T_{CB})^{0,1405} \cdot (V_{CA}^{0,4} + V_{CB}^{0,4})^2} \quad (6)$$

D_v : Diffusivité , cm^2 / s

T : température , K

M_A , M_B : masses moléculaires des composés A et B .

T_{CA} , T_{CB} : températures critiques de A et B , K

V_{CA} , V_{CB} : volume molaire critique de A et B , $\text{cm}^3 / \text{g} \cdot \text{mol}$;

P : pression , Atm.

2 - 6: Diffusion en régime turbulent :

Dans le cas de régime turbulent le transfert de matière d'un lieu à un autre est caractérisé par la relation suivante :

$$J_{A,t} = - \epsilon_N \cdot \frac{dc}{db} \quad (7)$$

$J_{A,t}$: flux molaire de A , causé par un mouvement turbulent .

ϵ_N : Diffusivité

Le flux molaire total , relatif à la phase total , devient :

$$J_A = - (D_v + \epsilon_N) \cdot \rho \cdot M \cdot \frac{dc}{db} \quad (8)$$

La diffusivité tourbillonnante ϵ_N dépend des propriétés du fluide mais aussi de la position du courant d'écoulement .

2 - 7: Écoulement à l'intérieur des conduites .

Les corrélations pour le transfert de matière à l'intérieur des conduites seraient de la même forme que ceux de transfert de chaleur .

Les équations fondamentales pour la diffusion et la conduction sont similaires .

En remplaçant les nombres de NUSSELT et PRANDL dans l'équation suivante :

$$\frac{h_i \cdot D}{K} = 0,023 \cdot \left(\frac{D \cdot G}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \mu}{K} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (9)$$

Par les nombres de SHERWOOD et SCHMIDT , l'équation devient .

$$Sh = 0,023 \cdot Re \cdot Sc^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (10)$$

Cette équation donne un bon accord sur un large domaine des nombres de REYNOLDS et de SCHMIDT .

Une forme alternative de la corrélation est obtenue en divisant l'équation précédente $Re \cdot Sc$ qui donne le facteur J_M .

COLBURN et CHILTON ont montré que ce facteur était équivalent à J_H . Le

Le terme $\left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$ est souvent égal à 1 pour le transfert de masse .

$$J_M = J_H = \frac{\rho}{2} = 0,023 Re^{-0,2} \quad (11)$$

Cette équation est générale pour le transfert de masse et de chaleur dans le même équipement .

Plusieurs autres corrélations à faibles précisions ont été présentées pour différents domaines de nombre de SCHMIDT .

Pour l'évaporation de certains liquides dans les colonnes à parois mouillées certaines corrélations ont été établies , avec des exposants supérieures pour les deux nombres de REYNOLDS et de SCHMIDT .

$$Sh = 0,023 Re^{0,81} \cdot Sc^{0,44} \quad (12)$$

Pour le nombre de SCHMIDT variant entre 0,60 et 2,5 .

Une corrélation pour le transfert de masse à des nombres de SCHMIDT élevés 400 à 10^5 était obtenue , en mesurant la vitesse d'écoulement des solutions dans l'eau et dans les liquides visqueux .

$$Sh = 0,0096 Re^{0,913} \cdot Sc^{0,346} \quad (13)$$

3-1: OPERATION D'HUMIDIFICATION .

L'humidification et la déshumidification désigne le transfert de matière entre phase liquide pure et un gaz fixe qui est insoluble dans le liquide. Ces opérations sont souvent aussi simple que l'absorption des gaz ou l'extraction.

Quant le liquide contient un seul composé, il n'y a pas de gradient de concentration et pas de résistance de transfert dans la phase liquide, et les transferts de matière et de chaleur sont importants et l'un influence sur l'autre.

3-2: Théorie du processus d'humidification .

L'interaction entre un gaz non saturé et un liquide à la température du bulbe mouillé du gaz est le processus qui est contrôlé par l'écoulement de la chaleur et la diffusion de la vapeur à travers le gaz à l'interface entre le liquide et le gaz.

Lors de l'humidification adiabatique, où le liquide reste à une température constante, il n'y a pas de gradient de température à travers le liquide, alors que lors de la déshumidification et le refroidissement des liquides, c'est la température du liquide qui change.

Cela est dû à l'écoulement de chaleur à travers le liquide et le gradient de température monte considérablement.

3-3: Mécanisme de l'interaction gaz-liquide .

Il est important d'obtenir une image correcte des relations de transfert de chaleur et de vapeur dans toutes les situations de contact gaz-liquide.

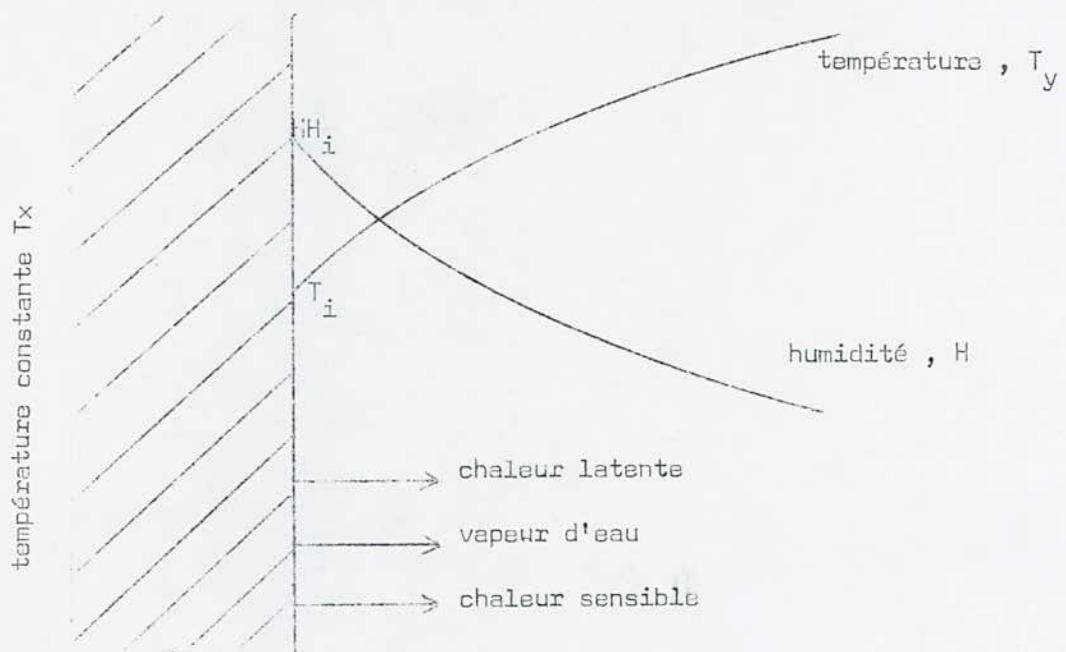


FIG: 2 : conditions dans l'humidification adiabatique

H_i : Humidité à l'interface

H : Humidité de gaz

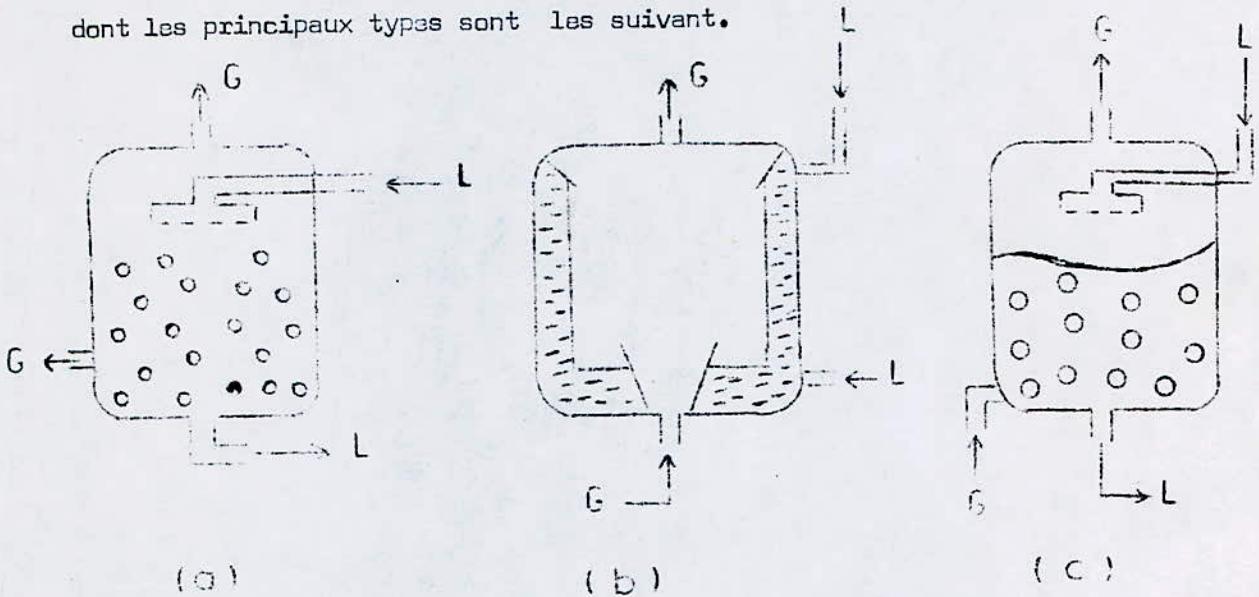
T_y : Température du gaz

T_i : Température à l'interface

CHAPITRE 4

4-1: APPAREILS DE MISE EN CONTACT GAZ - LIQUIDE POUR ABSORPTION

Une opération d'absorption industrielle est en générale effectuée en continu dans l'un des très nombreux et très variés appareils qui ont été imaginés et dont les principaux types sont les suivant.



G: gaz

L: liquide

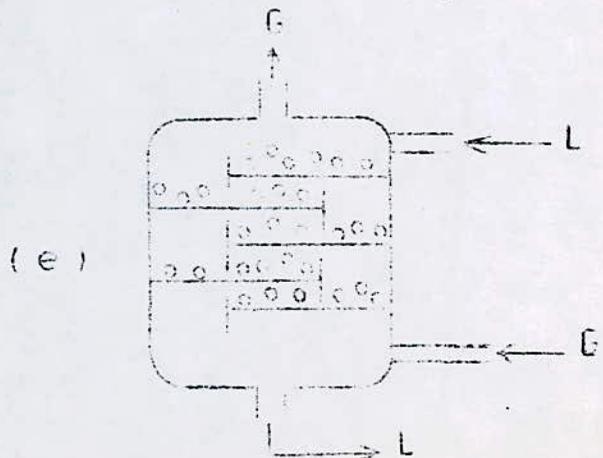
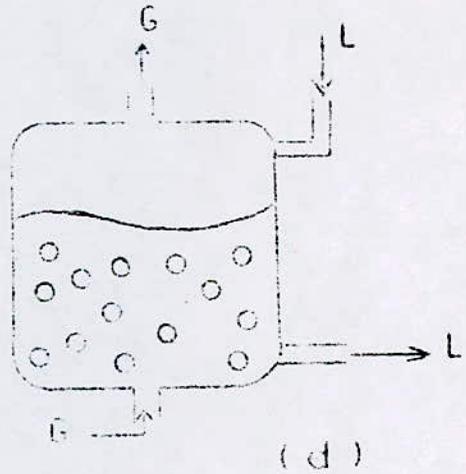
(a): colonne à gouttes

(b): colonne à film

(c): colonne à garnissage

(d): colonne à bulles

(e): colonne à plateaux



4-1-1: Appareils à balles 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. fig. 3. chaque compartiment est doté d'un lit de sphères de faible poids spécifique.

Les sphères les plus couramment utilisés sont réalisées en polyéthylène ou polypropylène, mais d'autres matériaux peuvent également être utilisés.

Pour des débits de gaz et de liquide nuls, le lit de sphère occupe une hauteur statique H_s .

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.

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 encrasement de l'appareil ne soit possible du fait de l'agitation des balles.

Origines du procédé :

Ce procédé a été mis au point à la fin de l'année 1959, il 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 quantité suffisamment grande pour proscrire l'emploi d'une tour à garnissage classique.

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

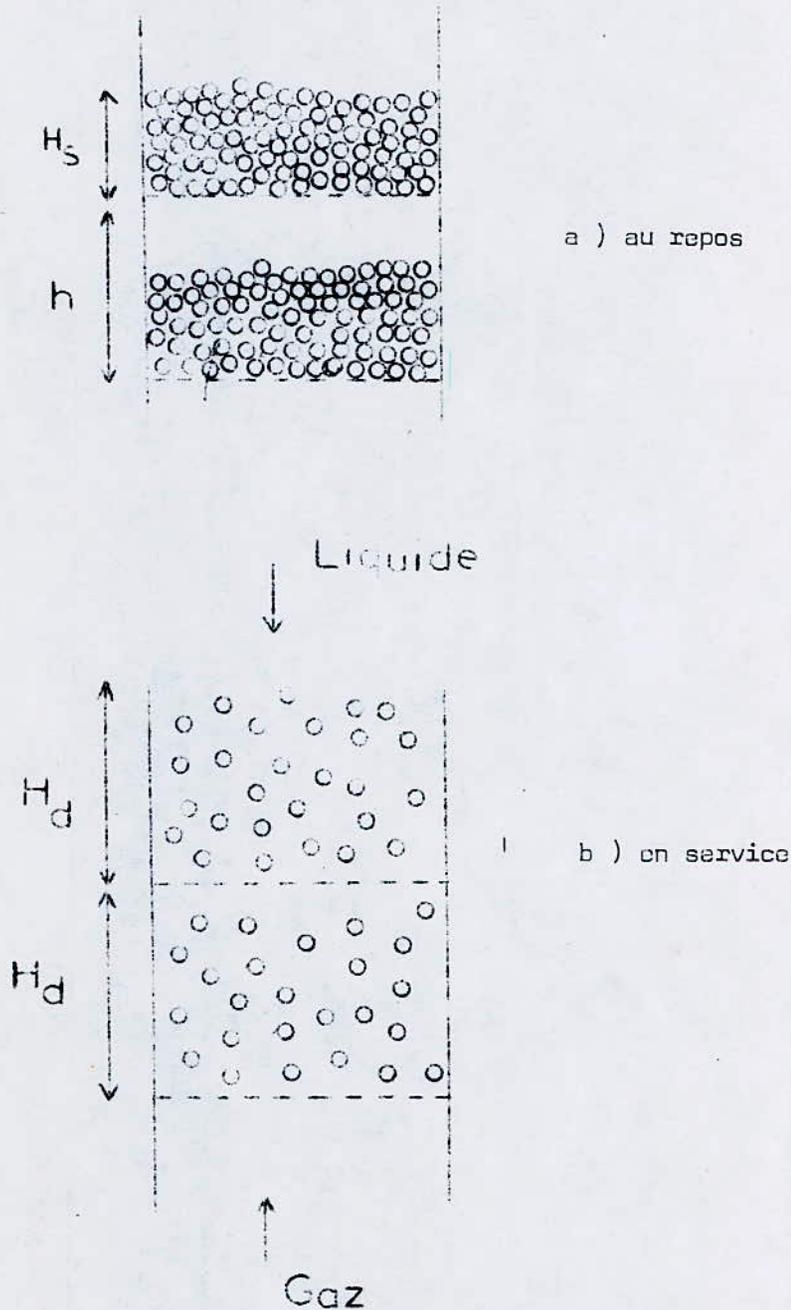


Fig: 3 - Appareil à balles flottantes

CHAPITRE:5

5-1 : CARACTÉRISTIQUE DE L'AIR HUMIDE

Le contact de l'eau s'effectue à contre-courant avec l'air dans une colonne verticale.

Comme nous sommes appelés à travailler avec l'air, nous avons jugé nécessaire de donner quelques caractéristiques de celui-ci.

5-1-1: L'air et l'humidité .

Composition : L'air que nous respirons est composé de différents gaz dont la vapeur d'eau.

Une composition détaillée fait apparaître les gaz en % volumique.

-oxygène	21,00
-Azote	78,00
-Argon, Néon, Xénon	0,90
-Gaz carbonique	0,03
-Vapeur d'eau entre	0,05 - 1,5

5-1-2: Quantité de vapeur d'eau .

Celle-ci est extrêmement variable et a une importance considérable en séchage, refroidissement de l'eau, humidification, déshumidification, climatisation etc...

A une température donnée, 1m^3 d'air ne peut en absorber qu'une quantité limitée .

On dit que l'air se sature.

La quantité maximum de vapeur d'eau qu'un Kg d'air peut absorber est une fonction croissante de la température.

5-1-3: Humidité relative.

C'est le pourcentage de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à la quantité contenue dans l'air saturé à la même température .

Elle est donnée par la même température

5-1-4 Humidité absolue :

L'unité de concentration ou la teneur en humidité Y est définie par la relation.

$$Y = \frac{\text{kg d'eau dans l'air sec}}{\text{kg d'air sec}} \quad (14)$$

En notant par p_{la} la pression partielle de l'air sec, on peut écrire (loi de DALTON)

$$P = P_a + P_v \quad (15)$$

2 Etant donné que les composantes occupent le même volume et ont la même température T .

Les équations d'états peuvent s'écrire.

$$P_a \cdot V = \frac{R \cdot T}{M_a} \quad \text{pour } 1 \text{ Kg d'air sec} \quad (16)$$

$$P_v \cdot V = \frac{xR \cdot T}{M_v} \quad \text{pour } x \text{ Kg d'eau associé} \quad (17)$$

où R (1.atm. / K . mole) constante des gaz parfaits

M_a (g) masse moléculaire de l'air.

M_v (g) masse moléculaire de la vapeur d'eau.

Le rapport de l'équation 17 sur 16 donne:

$$\frac{P_v}{P_a} = x \cdot \frac{M_a}{M_v} \quad \text{d'où} \quad x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{P_v}{P_a} \quad (18)$$

L'humidité absolue s'écrit alors:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{\phi \cdot P_s}{P - \phi \cdot P_s} = \text{ce qui donne} \quad x = 0,622 \frac{\phi \cdot P_s}{P - \phi \cdot P_s} \quad (19)$$

5-1-5 Point de rosé :

Si on refroidit un volume d'air déterminé son degré hygrométrique augmente

du fait que Y_s diminue avec la température, Y reste constante.

Quant $Y_s = Y$, l'air est saturé, on atteint le point de rosé.

5-2: Diagramme de l'air humide:

Pour permettre d'effectuer avec plus de facilité les différents calculs sur l'air, de nombreuses données ont été rassemblées.

Le diagramme comporte généralement les données suivantes:

Température sèche, température humide, humidité relative, enthalpie, pression partielle de la vapeur d'eau contenu dans l'air humide.

Température sèche (noté t_d)

C'est la température marquée par un thermomètre dont le bulbe est gainé par une mousseline imbibée d'eau et ventilé par un courant d'air.

Température humide (noté t_w)

C'est la température de l'air extérieur mesurée par un thermomètre ventilé et non soumis au rayonnement.

Le psychromètre d'ASSMANN voir annexe fig : 1-4 .

Le psychromètre d'ASSMANN REPRÉSENTE l'instrument standard utilisé pour la mesure de l'humidité relative. X

Un ventilateur entraîné par moteur ou par enroulement est incorporé dans la tête pour aspirer l'air à partir du fond, un des bulbes est recouvert de gaze.

Le degré d'humidité est déterminé en mesurant la différence de température entre les deux bulbes.

1^{re} PARTIE

EXPI^{re}IMENTALE

(1)

1 : DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE UTILISE

Il se divise en deux parties

1 - La colonne

2 - L'appareillage de réglage et de mesure.

1-1: La colonne :

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

1-1-1: Suport de garnissage :

C'est une plaque en polychlorure de vinyl perforé, à 60% de vide.

1-2 Corps de remplissage :

Ce sont des balles sphériques en polypropylène , leur caractéristique sont données dans le tableau - 1

1-2 : Appareillage de réglage et de mesure.

1-2-1: Mesure de débit de gaz:

Le débit de gaz est mesuré à l'aide d'un rotamètre préalablement étalonné , dont le débit maximum est $15 \text{ m}^3 / \text{h}$ voir figure (1-2).

1-2-2: Mesure de débit liquide.

La colonne est alimentée en eau à l'aide d'une pompe centrifuge , la mesure du débit est obtenue grâce à un débitmètre préalablement étalonné , figure (1-3)

1-2-3: Mesure des pertes de pression .

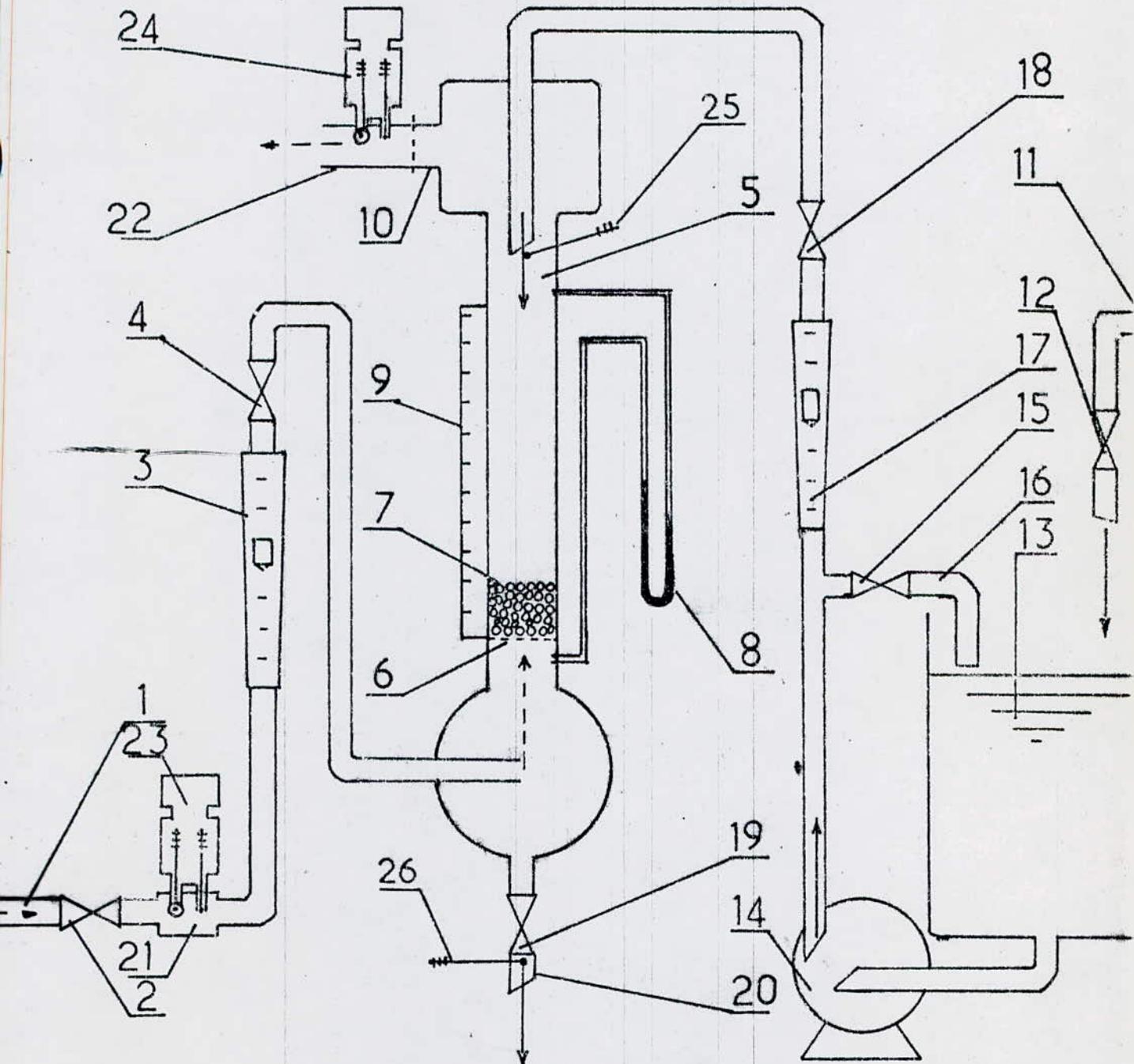
La chute de pression le long de la colonne est mesurée à l'aide d'un manomètre en eau. La distance séparant les prises de pression est $L = 80 \text{ cm}$

1-2-4: Mesure de l'humidité relative de l'air .

La mesure de l'humidité relative de l'air se fait à l'aide d'un psychromètre d'ASSMANN voir figure (1 - 4) en annexe.

Le schéma générale de l'installation est représenté sur la figure (1-1)

Figure.1.1 . SCHEMA DE L'INSTALLATION



LEGENDE

- 1 - Tube d'entrée du gaz
- +2 - Vanne d'alimentation en gaz
- 3 - Débitmètre phase gazeuse
- +4 - Vanne pour réglage du débit de gaz
- 5 - Colonne
- 6 - Support du garnissage
- 7 - Corps de garnissage
- 8 - Manomètre
- 9 - Echelle de la hauteur dynamique
- 10 - Tube de sortie du gaz
- 11 - Tube D'alimentation en eau
- +12 - Vanne d'alimentation en eau
- 13 - Bac d'alimentation
- 14 - Pompe centrifuge
- +15 - Vanne de recyclage de l'eau
- 16 - Tube de recyclage de l'eau
- 17 - débitmètre phase liquide
- +18 - Vanne pour réglage du débit d'eau
- +19 - Vanne de sortie de l'eau
- 20 - Tube d'évacuation de l'eau
- 21 , 22 - Cellule psychrometrique
- 25 , 26 - Thermomètre
- - - - - ➤ : Ecoulement de l'air
- ➔ : Ecoulement de l'eau

Tableau: 1 - caractéristiques des balles.

d_0 (mm)	ρ_s ($\frac{g}{cm^3}$)	ϵ (%)	α ($\frac{m^2}{m^3}$)	ϕ
10	351,78	40,54	600	1
8	981,54	37,80	750	1

2: ETALONNAGE DES APPAREILS DE MESURES :

Pour pouvoir faire une étude hydrodynamique de la colonne , il est nécessaire de faire l'étalonnage des instruments de mesure .

2-1: Etalonnage du débitmètre de liquide :

Le procédé d'étalonnage que nous avons adopté est le suivant .

Nous fixons le flotteur sur une position donnée et nous mesurons le volume V , obtenu pour un temps t .

Le débit volumique est alors donné par $L = \frac{V}{t}$. Les résultats de cet étalonnage sont les suivants .

position du flotteur	0 , 2	0 , 3	0 , 4	0 , 5	0 , 6	0 , 7	0 , 8	0 , 9	1 , 0
$V(m^3) \cdot 10^4$	14,8	28,8	27,3	23,2	27,6	32,4	37,6	41,6	46,4
t (s)	40	40	30	20	20	20	20	20	20
$L(m^3/s) \cdot 10^4$	0,37	0,72	0,91	1,16	1,38	1,62	1,88	2,08	2,32

2-2: 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 obtenus sont regroupés dans le tableau suivant.

Fig. 1.2. Etalonnage du débitmètre d'air

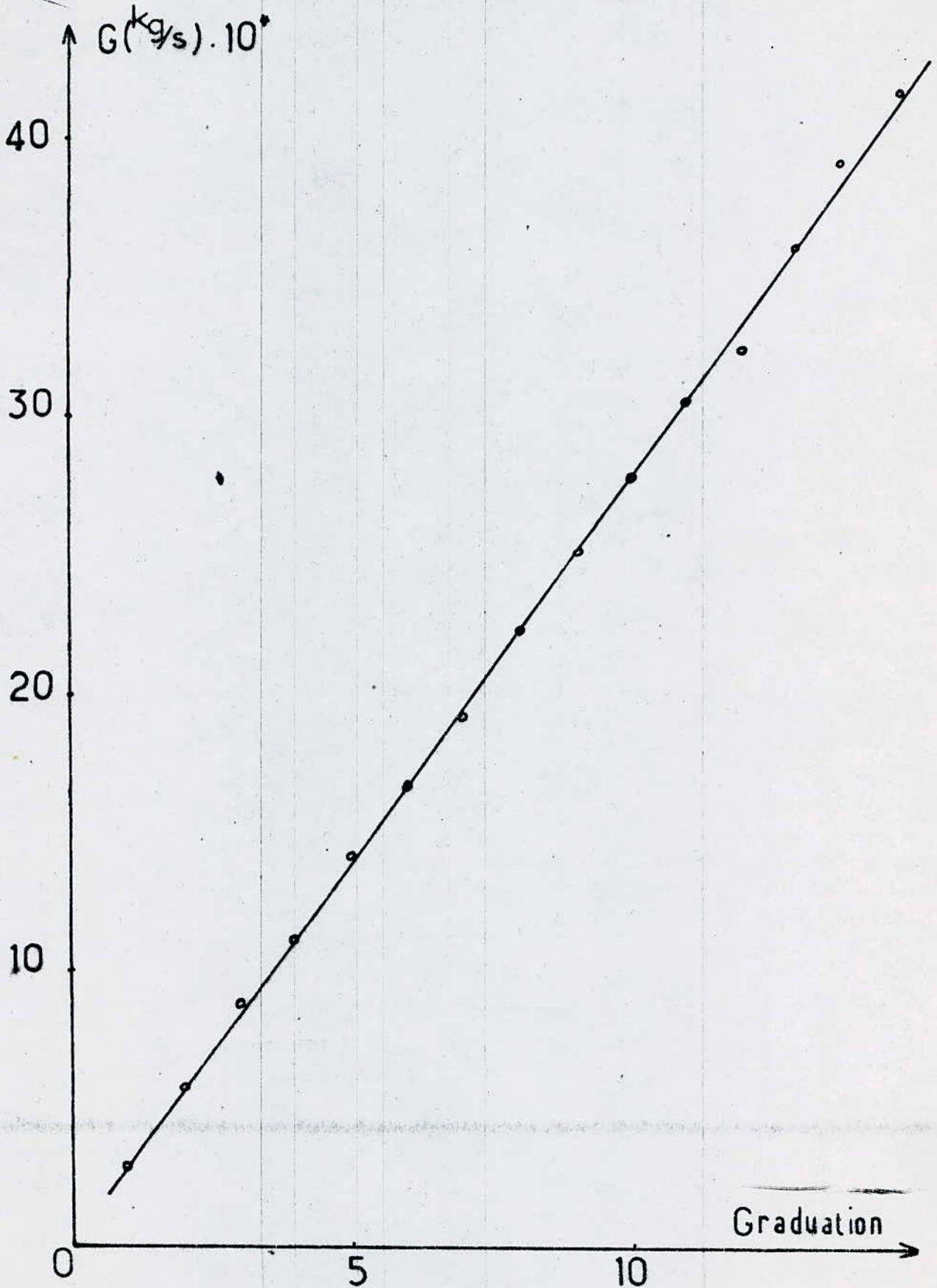
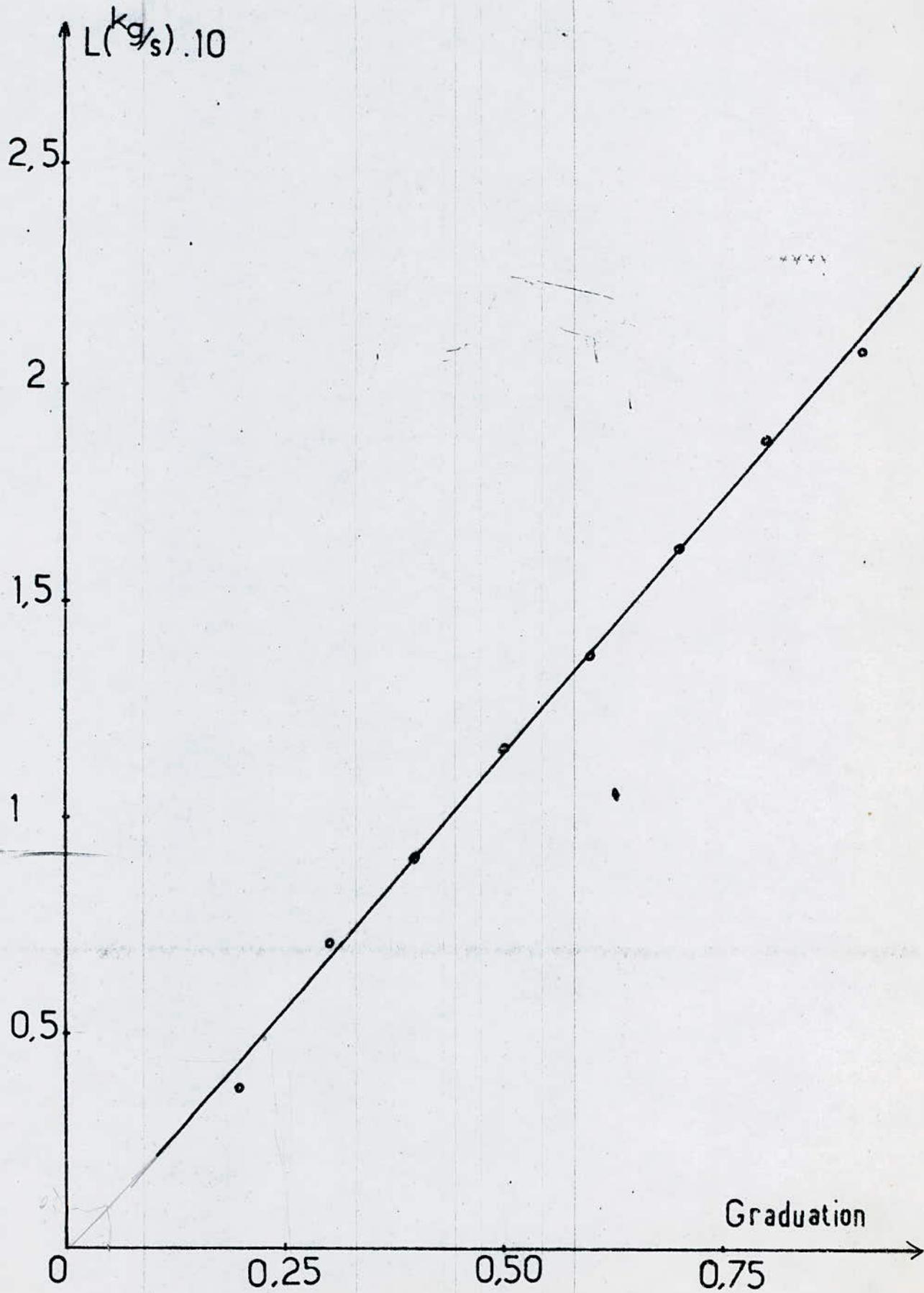


Fig.1-3. Etalonnage du débitmètre de liquide



CHAPITRE:3

3 : ETUDE HYDRODYNAMIQUE :

Cette étude a été précédée par l'étalonnage des appareils de mesures , débitmètres phase liquide et phase gazeuse dont les résultats et les courbes ont été annexés.

3 - 1 : Mode opératoire :

Nous commençant l'opération on fixe un débit liquide et on fait varier progressivement le débit d'air , on attend jusqu'à ce que le régime permanent soit établi .

A chaque fois on relève la perte de charge et la hauteur dynamique du lit.

Nous procédons de la même manière pour les différents débits liquide , hauteur statique et pour les deux types de balles .

3 - 2 : Conditions expérimentales :

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 , ceci a pour conséquence l'amélioration de transfert de masse et de chaleur .

$$5 \leq H_s \text{ (cm) } \leq 10$$

$$6,11 \leq L \text{ (m}^3 \text{ / s)} \cdot 10^5 \leq 7,77$$

$$8,33 \leq G \text{ (m}^3 \text{ / s)} \cdot 10^4 \leq 19,44$$

Figure.1

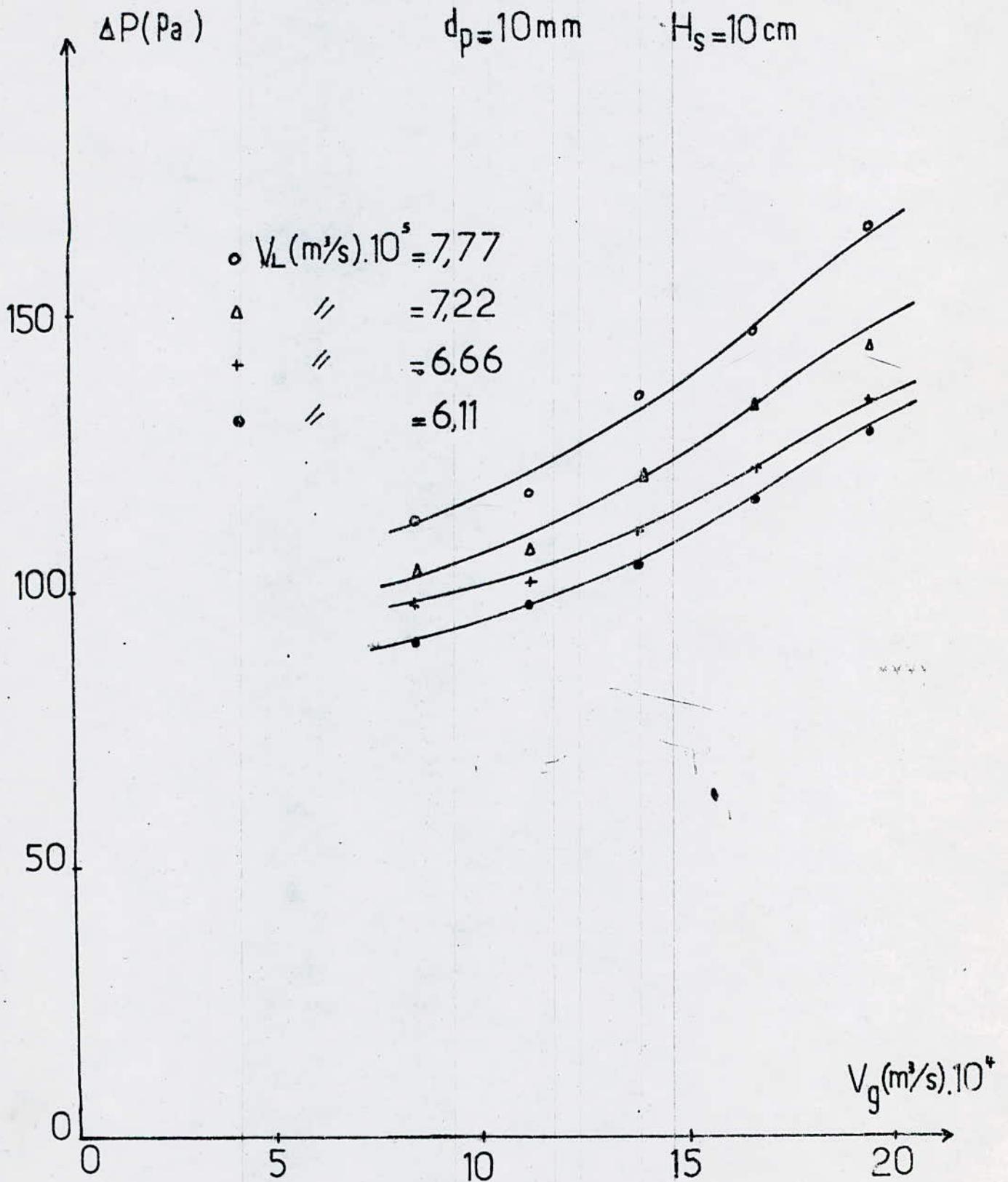
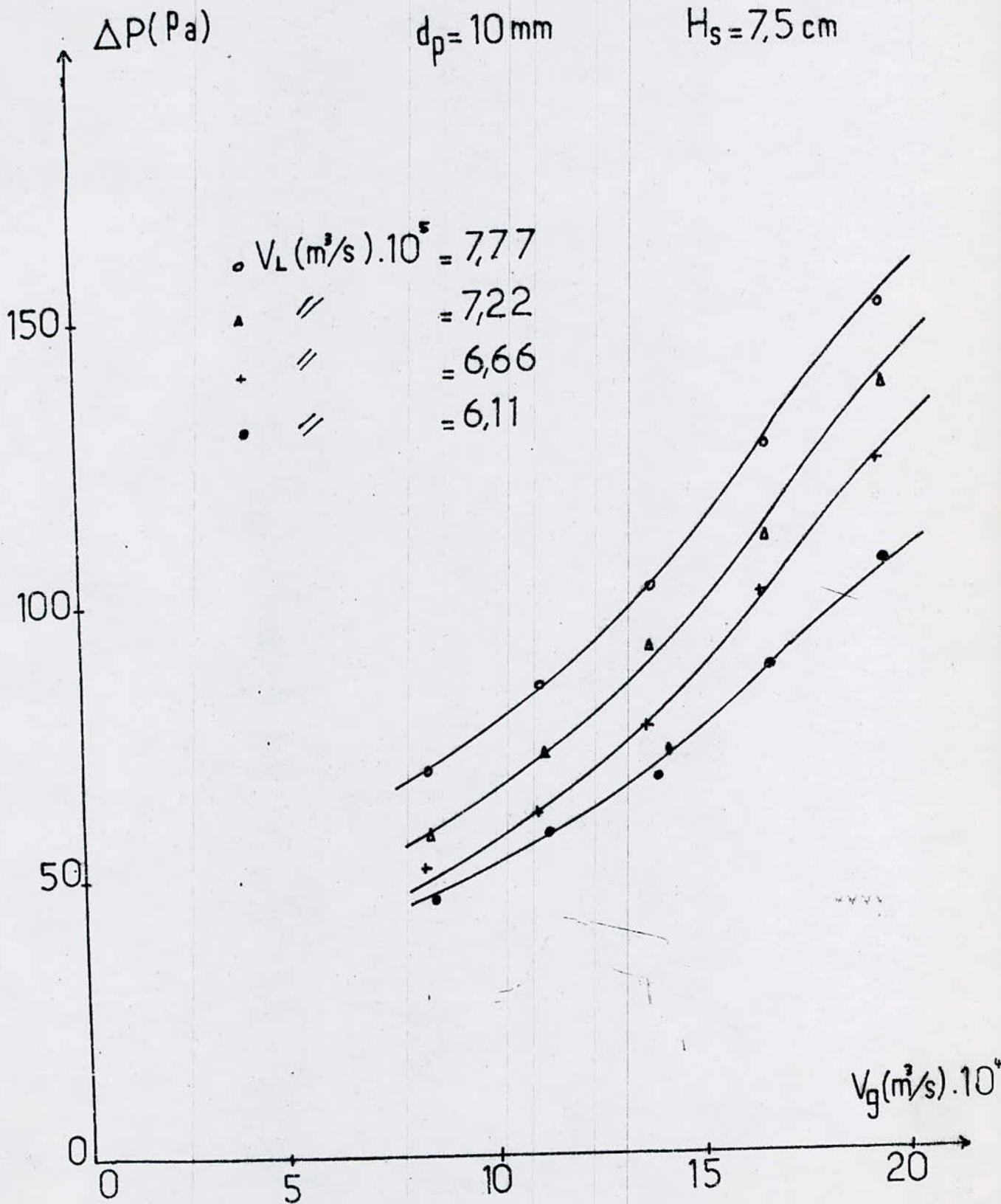


Figure-2



Figure_3

$d_p = 10 \text{ mm}$

$H_s = 5 \text{ cm}$

$\Delta P (\text{Pa})$

○ $V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5 = 7,77$

△ // = 7,22

+ // = 6,66

● // = 6,11

150

100

50

0

$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$

0

5

10

15

20

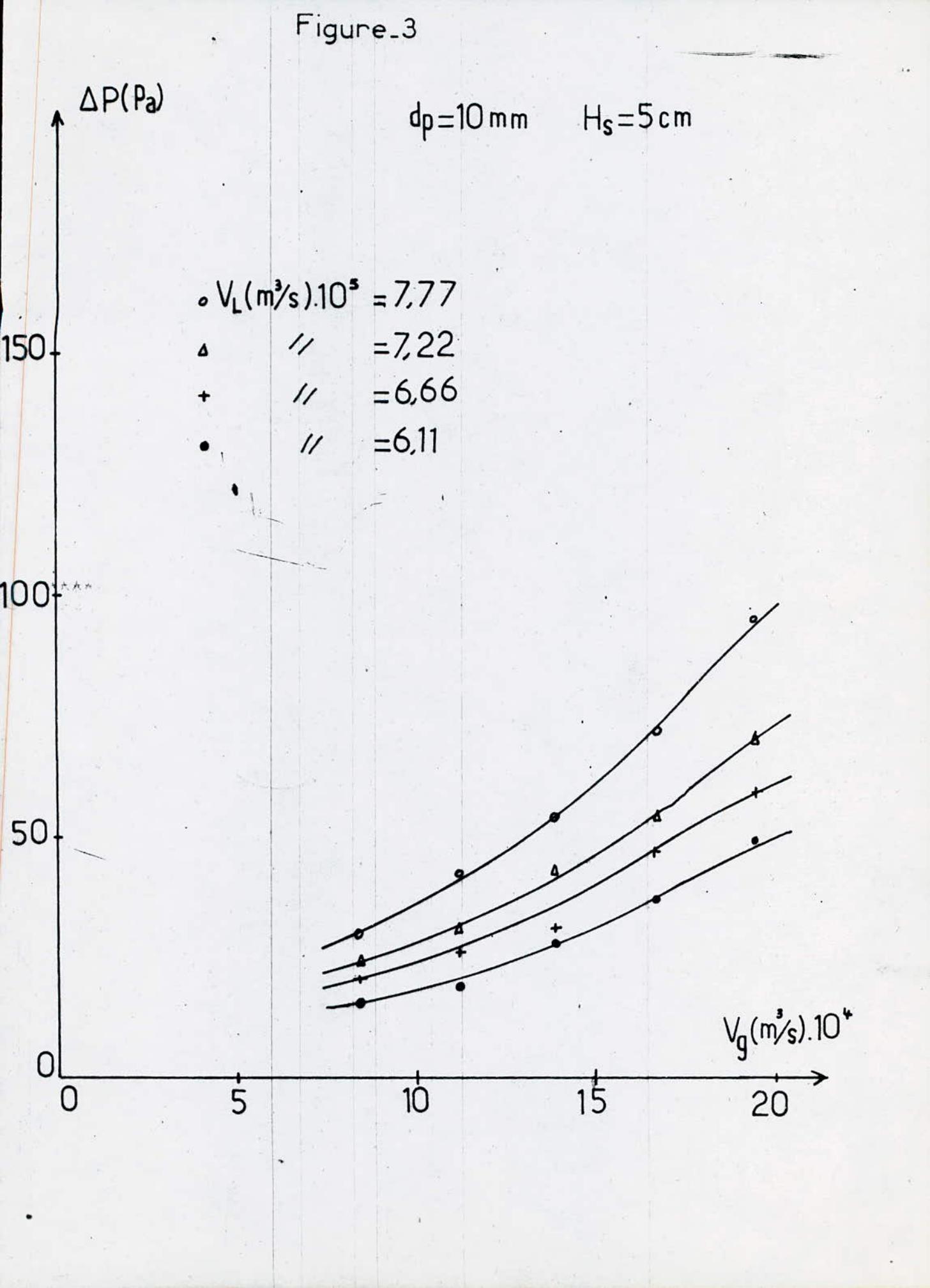


Figure-4

$d_p = 8 \text{ mm}$

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

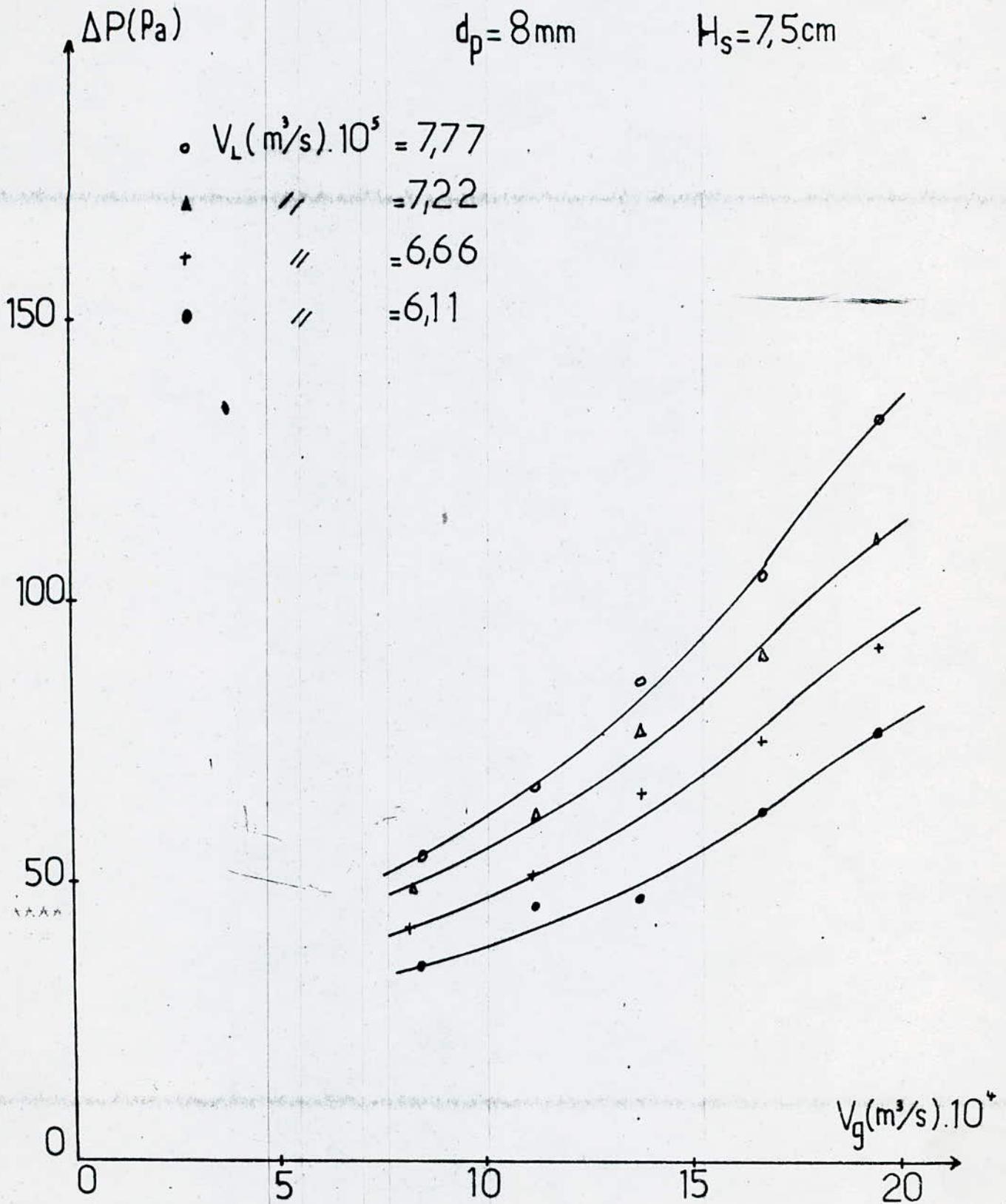


Figure -5

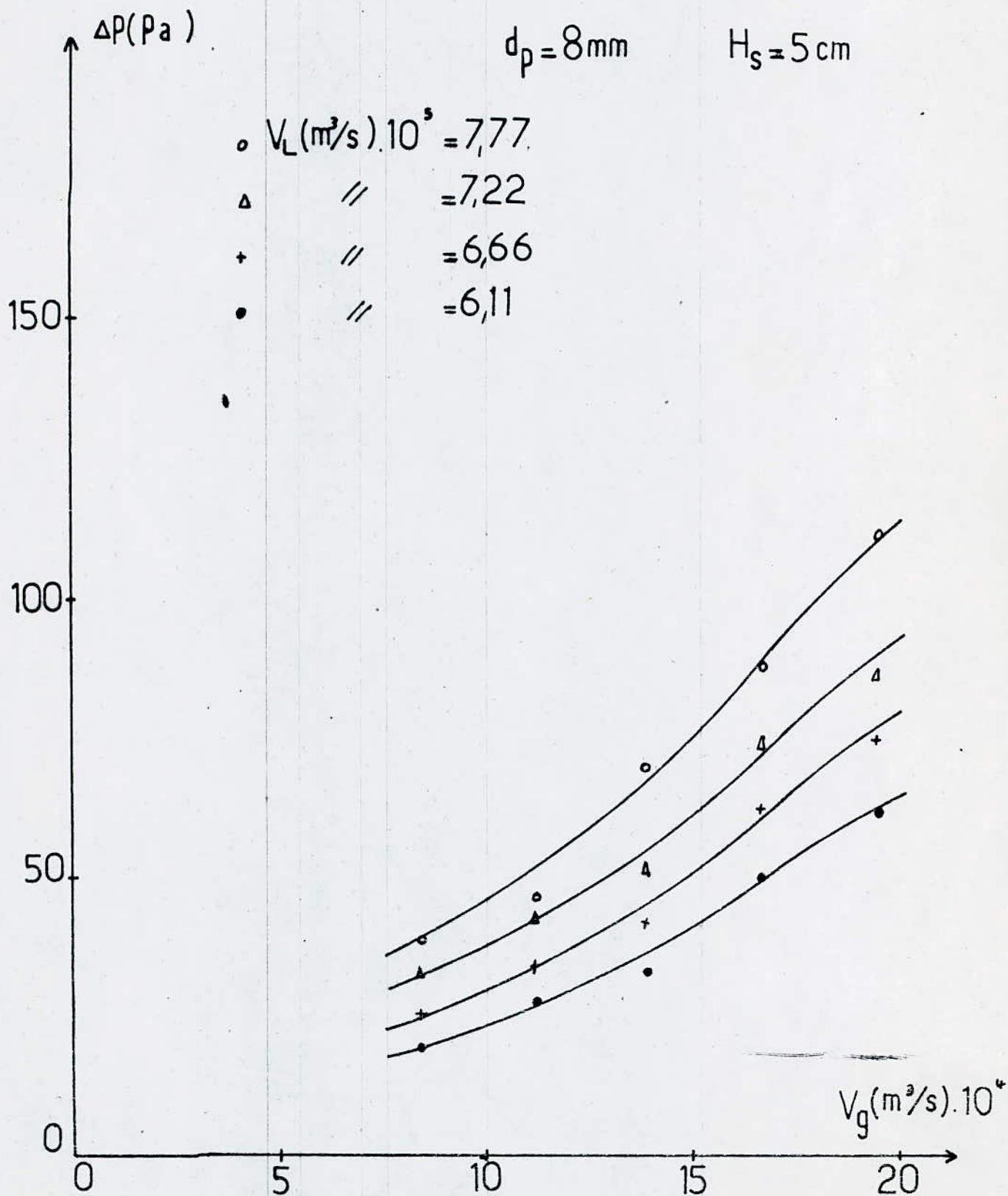


Figure-6

$d_p = 10 \text{ mm}$

$H_s = 10 \text{ mm}$

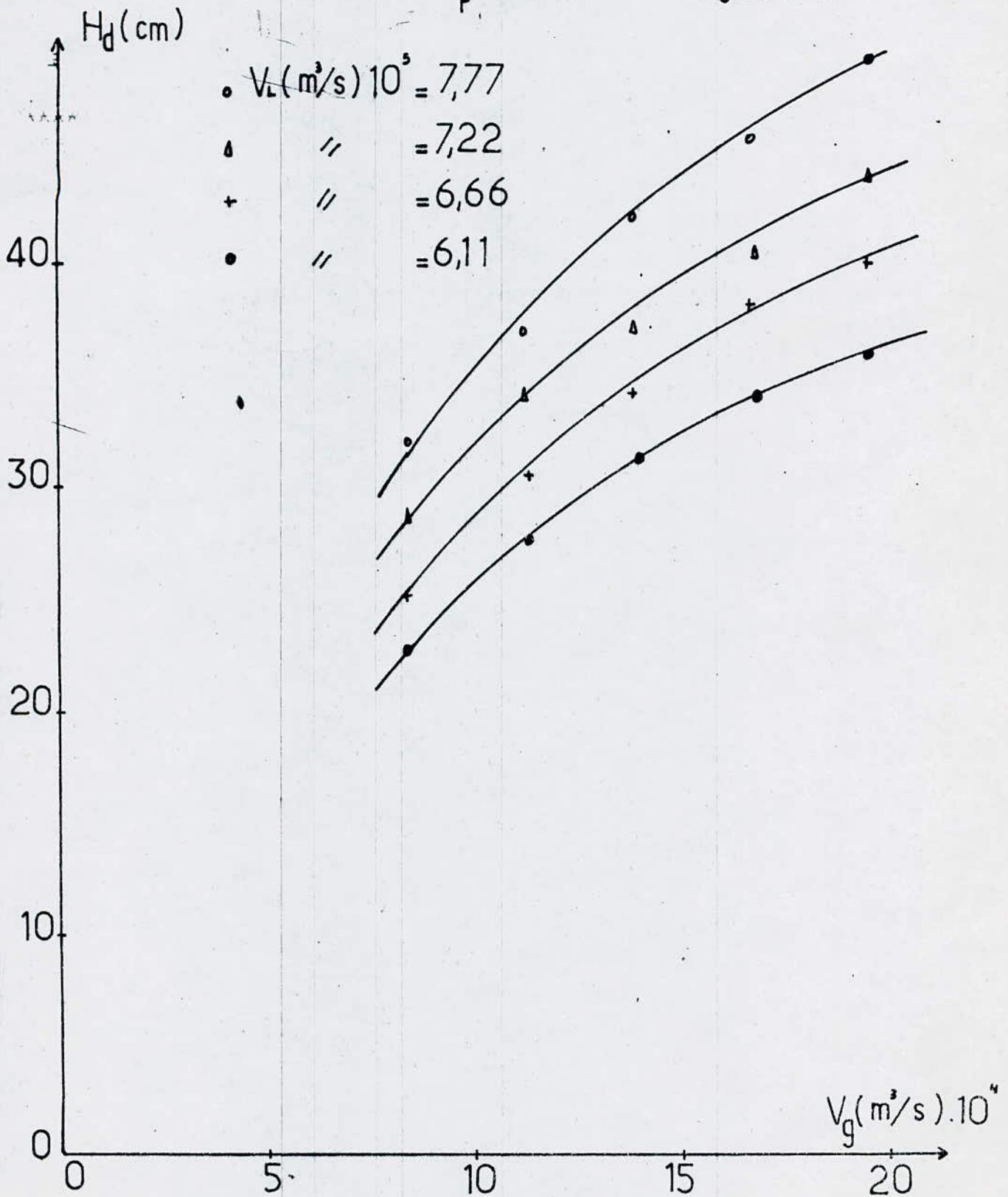
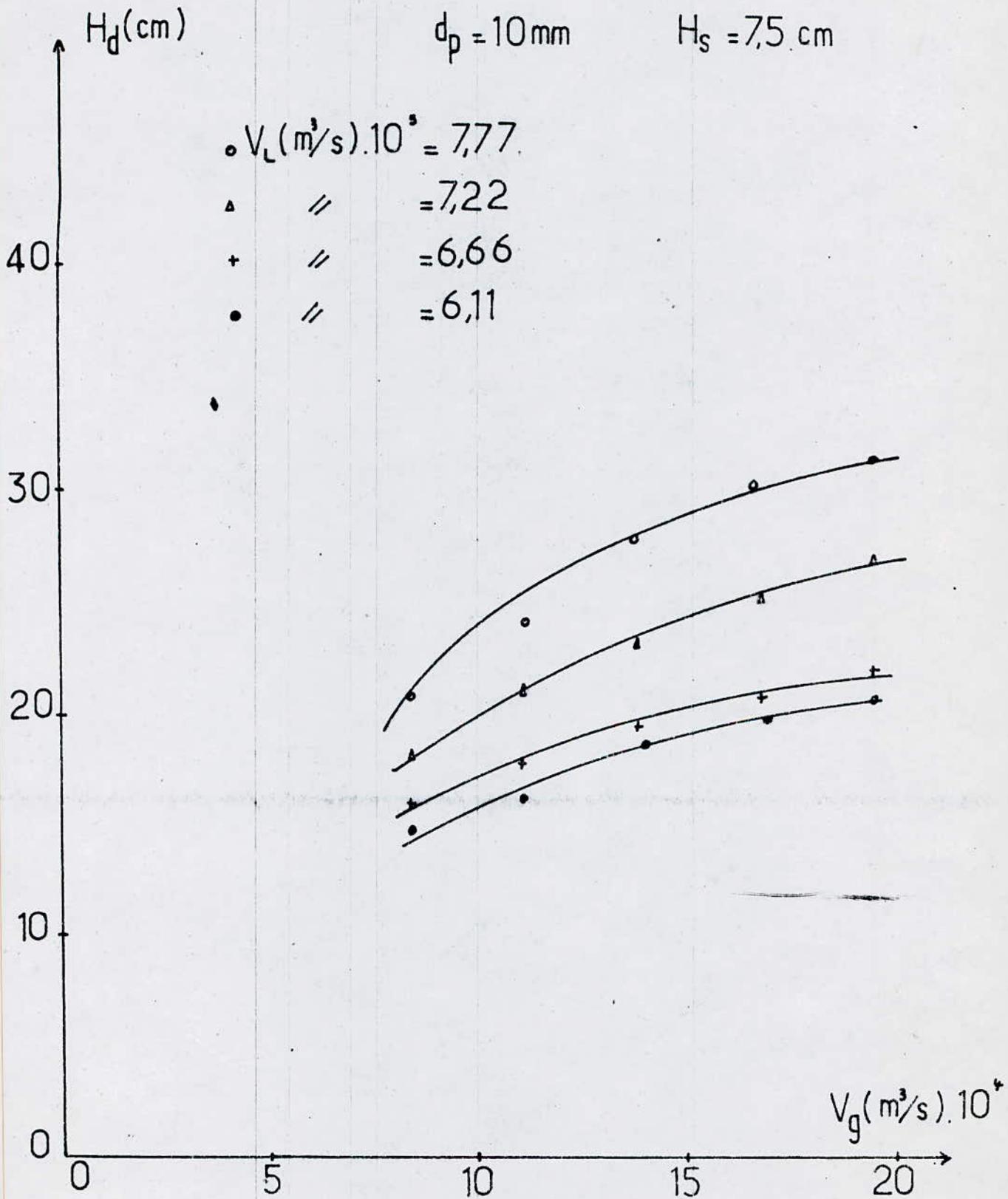


Figure-7



Figure_8

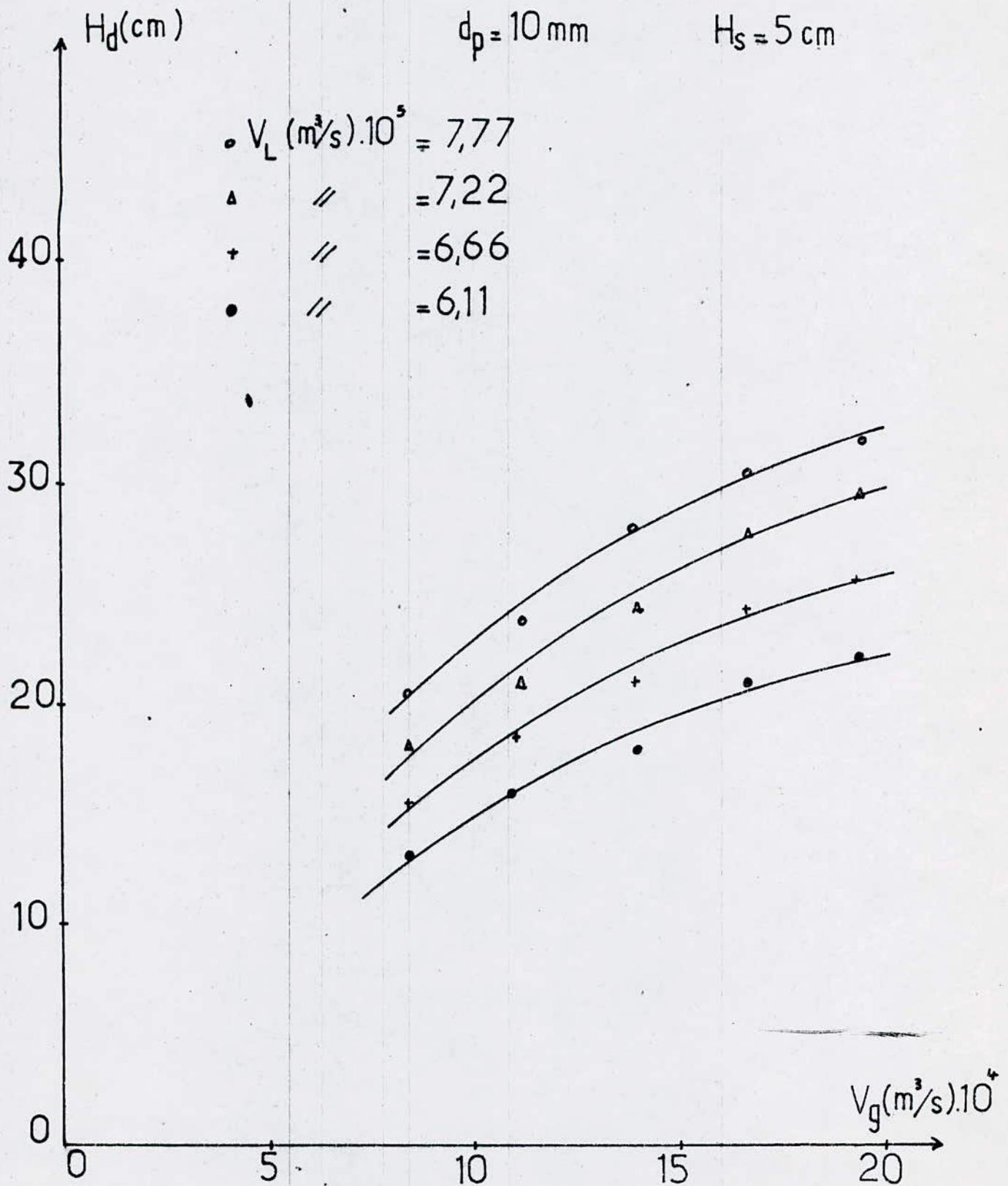


Figure -9

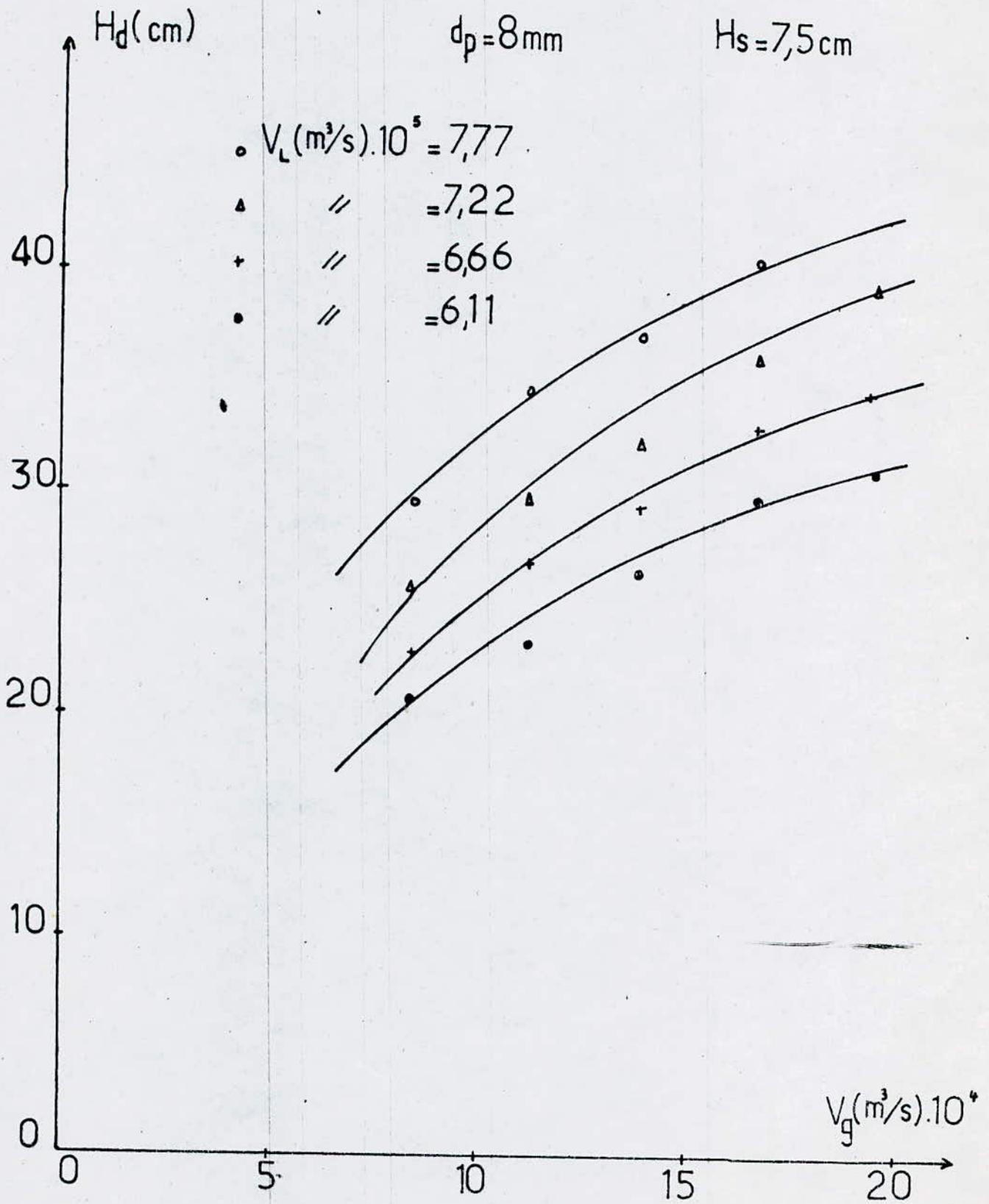


Figure-10

H_d (cm)

$d_p = 8 \text{ mm}$

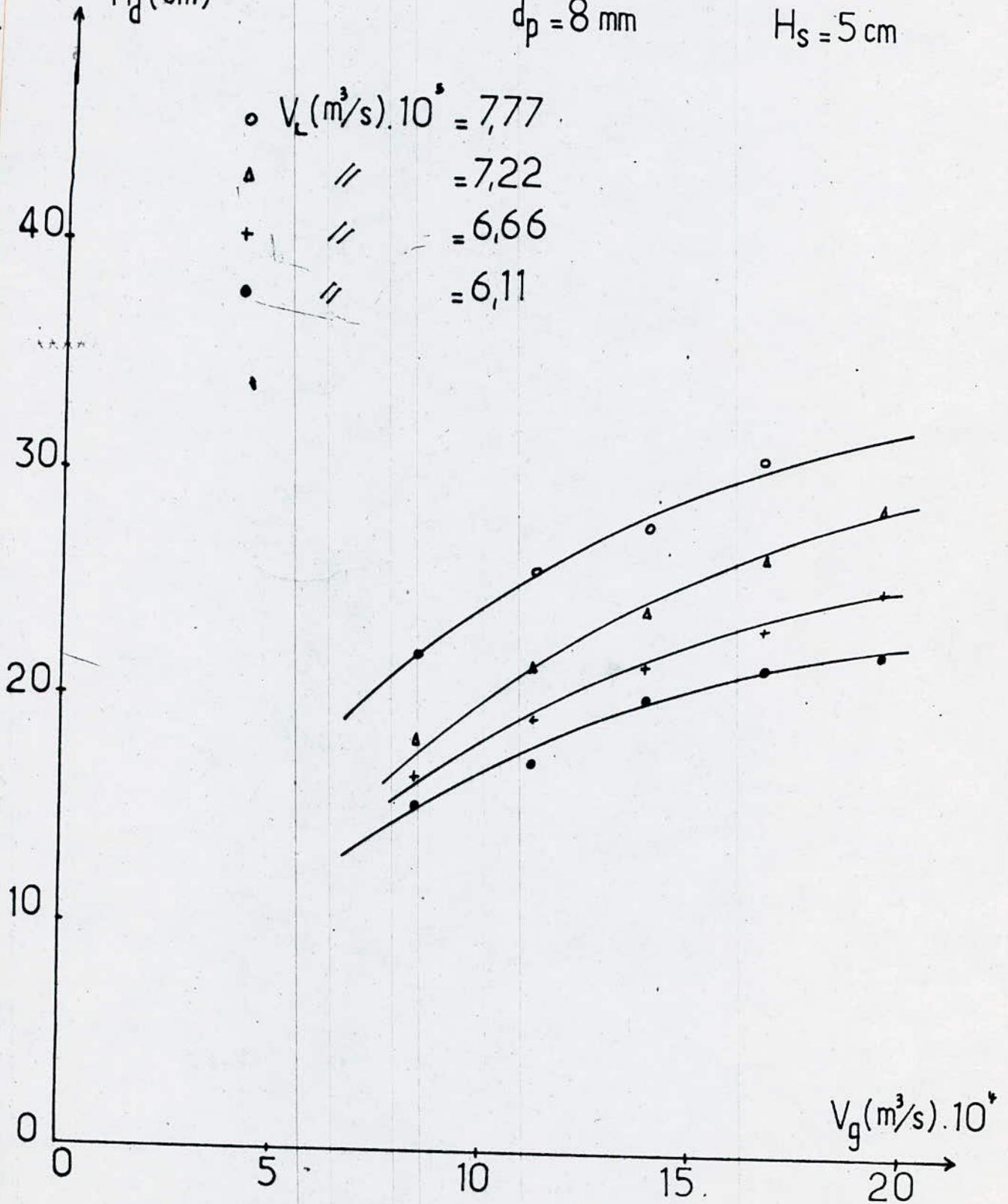
$H_s = 5 \text{ cm}$

○ $V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5 = 7,77$

△ // = 7,22

+ // = 6,66

● // = 6,11



3.3: Interprétation des courbes :

On a tracé deux sortes de courbes pour cette étude , qui représentent les variations de la perte de charge et de la hauteur dynamique en fonction des débits de gaz , de liquide , de la hauteur statique du lit et du diamètre des corps de remplissage .

Pour un débit liquide L , de faibles débits gazeux provoque une augmentation régulière de la perte de charge et de la hauteur dynamique .

En augmentant le débit gazeux , la perte de charge augmente jusqu'à un moment où on observe un point à partir de lequel la perte de charge augmente avec une pente de la courbe légèrement plus faible que le premier tronçon .

Pour une hauteur statique du lit supérieur la hauteur dynamique et la perte de charge augmentent d'un façon plus nette que précédemment , avec l'accroissement des débits de gaz et de liquide , ceci est dut à l'augmentation des frottements avec les corps de remplissages .

Pour les particules de diamètre 8 mm, la porosité du lit diminue , ceci est du à l'augmentation du nombre de particule pour un meme volume .

Ce qui contibue à l'augmentation de la perte de charge et la hauteur dynamique .

L'allure des coubes représentant la variation de la perte de charge en fonction du débit de gaz que nous avons obtenu suggère l'existence d'un maximum ne se trouvant pas sur la gamme de débit que nous avons utilisés .

4 : CONCLUSION

Les expériences ont été conduites en utilisant deux types de balles de densité et de diamètres différents , pour la recherche du comportement du lit fluidisé à trois phases avec une colonne verticale .

Cette étude hydrodynamique nous a permis d'établir un domaine d'homogénéité des trois phases , où la perte de charge est relativement faible et la hauteur dynamique très importante , ce qui assurera un bon transfert de matière et de chaleur .

Le domaine d'homogénéité que nous avons déterminé pour chaque paramètre est le suivant .

$$5 \text{ cm} \leq H_s \leq 10 \text{ cm}$$

$$6,11 \leq L (\text{m}^2/\text{s}) \cdot 10^5 \leq 7,77$$

$$8,33 \leq G (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4 \leq 19,44$$

1^{re} PARTIE

EXPI^{re}IMENTALE

(2)

CHAPITRE:1

1 : MODE OPERATOIRE :

Nous avons adopté pour nos essais , le mode opératoire suivant , cela pour chaque type de garnissage .

Après avoir choisi une hauteur statique et mesurer la pression atmosphérique .

- Remplir le bac d'alimentation d'eau (13) jusqu'au niveau du déversoir

- Brancher le compresseur

- Brancher la pompe (14) et régler le débit d'eau à partir de la vanne (18)

ET et du débitmètre . (17) .

- Régler le débit du gaz à partir des vannes (2 , 4) et du débitmètre (3) .

- Mesurer la hauteur dynamique du garnissage en utilisant la règle (9) et la porte de charge à partir du manomètre (8) .

- Noter la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la colonne en utilisant les thermomètres (25 , 26) .

- Mesurer l'humidité de l'air à l'entrée cellule (21) et à la sortie de la colonne cellule (22) à l'aide du psychromètre . (23 , 24) .

CHAPITRE:2

2 : ESSAIS DE TRANSFERT DE MATIÈRE :

Pour la détermination du coefficient de transfert de matière volumétrique en phase gazeuse ($K_g \cdot a$), nous procédons comme il a été indiqué au mode opératoire. Nous faisons plusieurs essais en variant à chaque fois le débit d'air et cela pour les deux types de garnissage et des hauteurs statiques successives de 5, 7,5, 10 cm. Les résultats que nous avons obtenu sont regroupés dans les tableaux de 1 à 20.

Pour la conception des calculs du coefficient d'échange de matière, on a fait les suppositions fondamentales suivantes du modèle d'échange.

- a) L'écoulement de l'air a le caractère de l'écoulement piston.
- b) Le liquide est parfaitement mélangé dans la colonne.
- c) Le transfert de matière se réalise selon la conception des films de WHITMAN.
- d) Il n'y a pas de résistance de transfert de matière en phase gazeuse.
- e) On a un régime permanent de fonctionnement dans toute l'appareil.

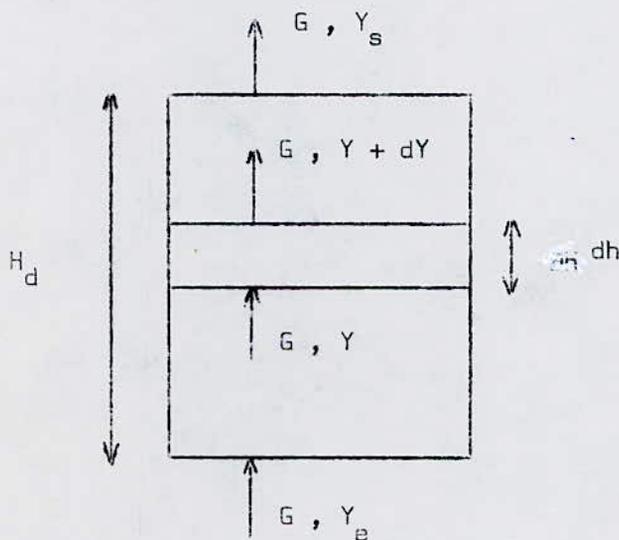


Figure -11

$d_p = 10 \text{ mm}$

$H_s = 10 \text{ cm}$

$k_g a \text{ (kg/m}^3\text{s)}$

- $V_L \text{ (m}^3\text{/s)} \cdot 10^5 = 7,77$
- △ // = 7,22
- + // = 6,66
- // = 6,11

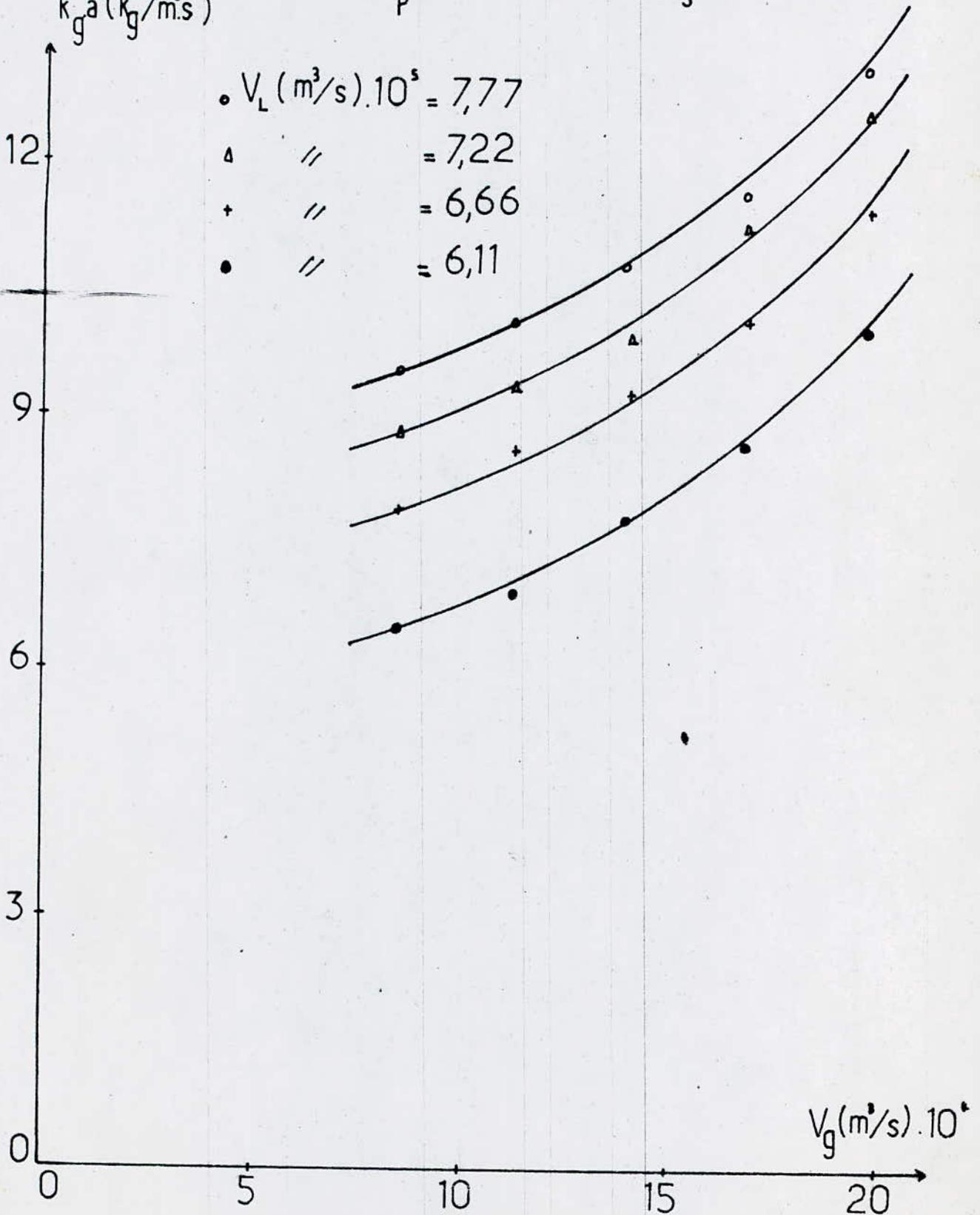


Figure .12

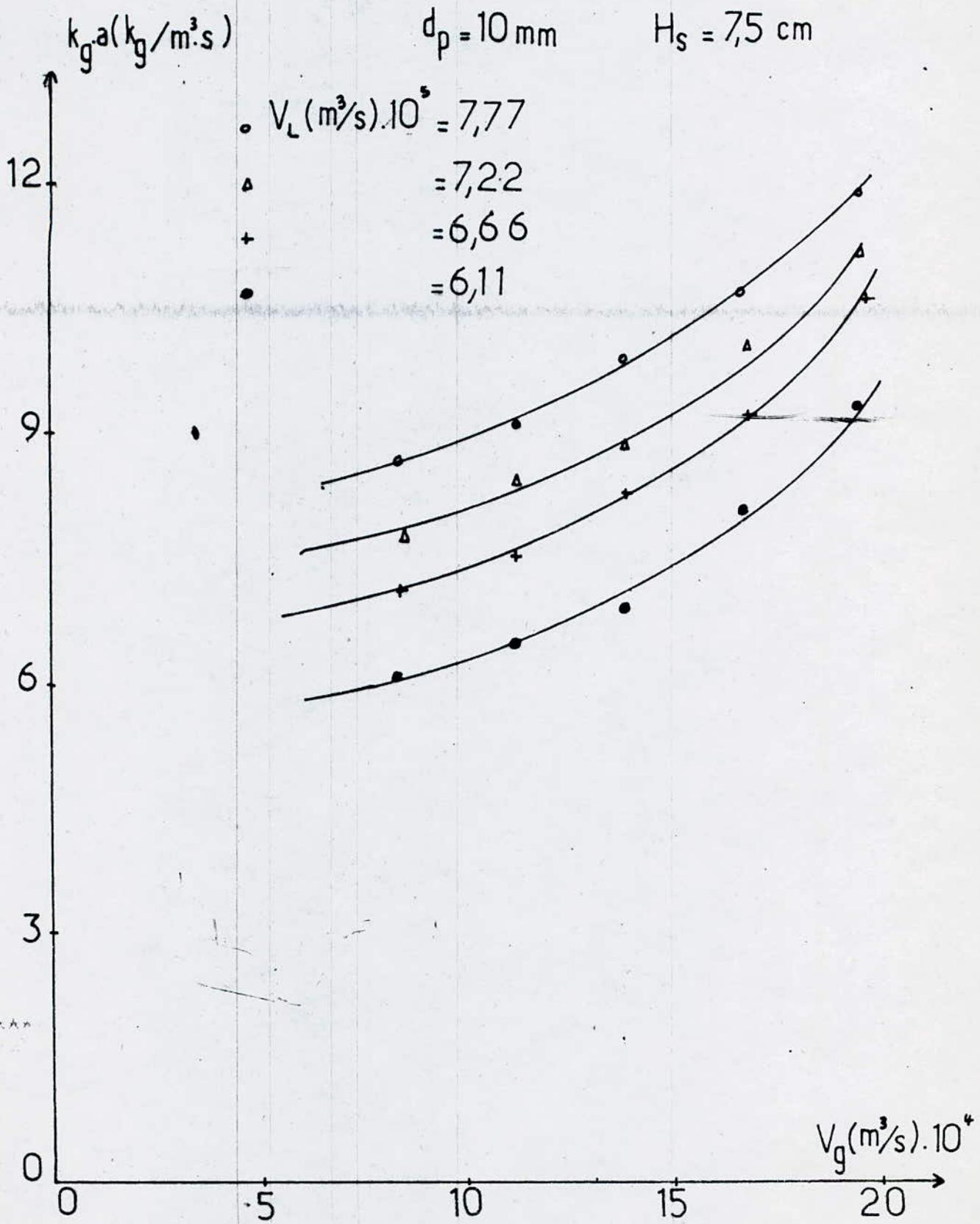


Figure -13

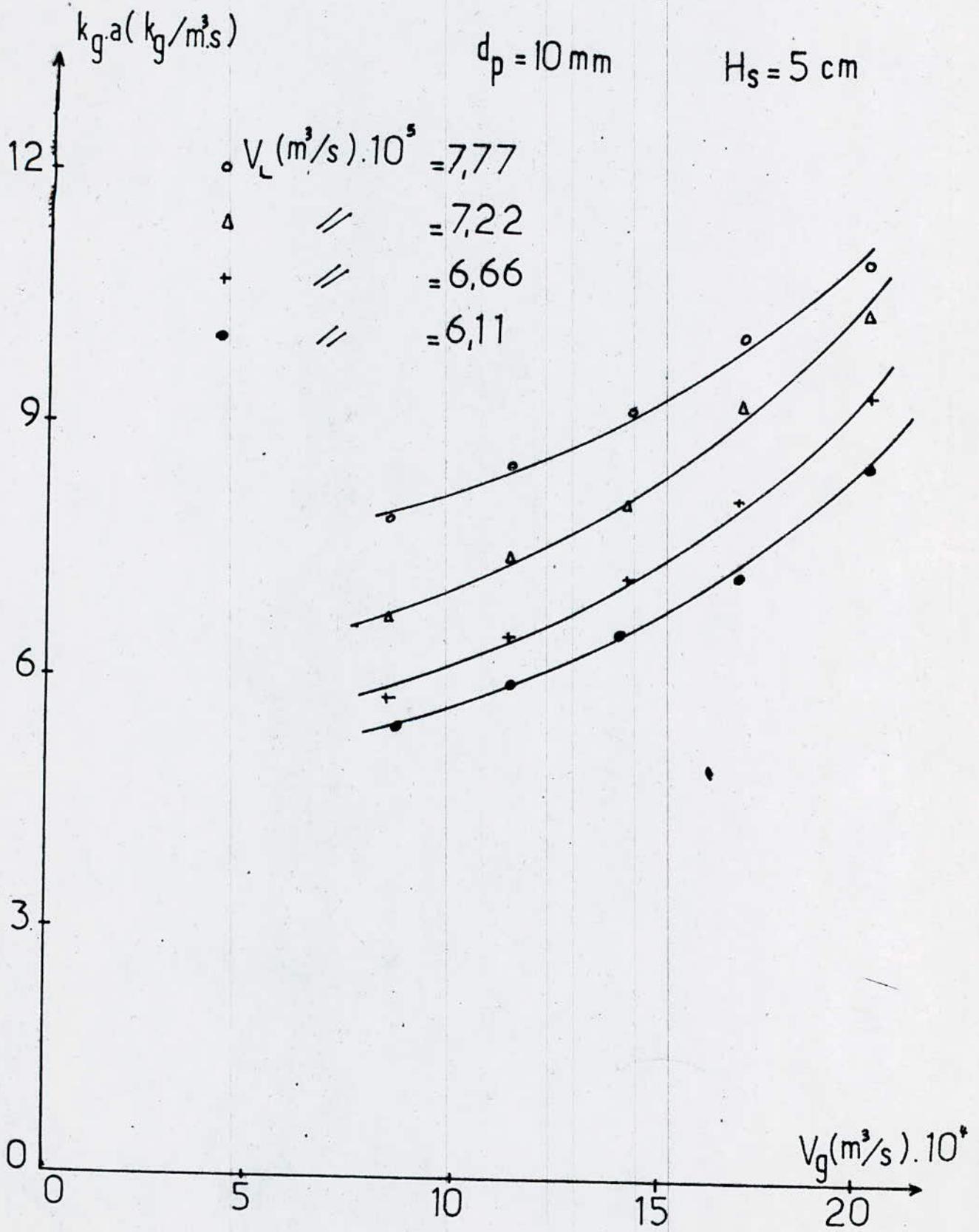


Figure 14

$d_p = 8 \text{ mm}$

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

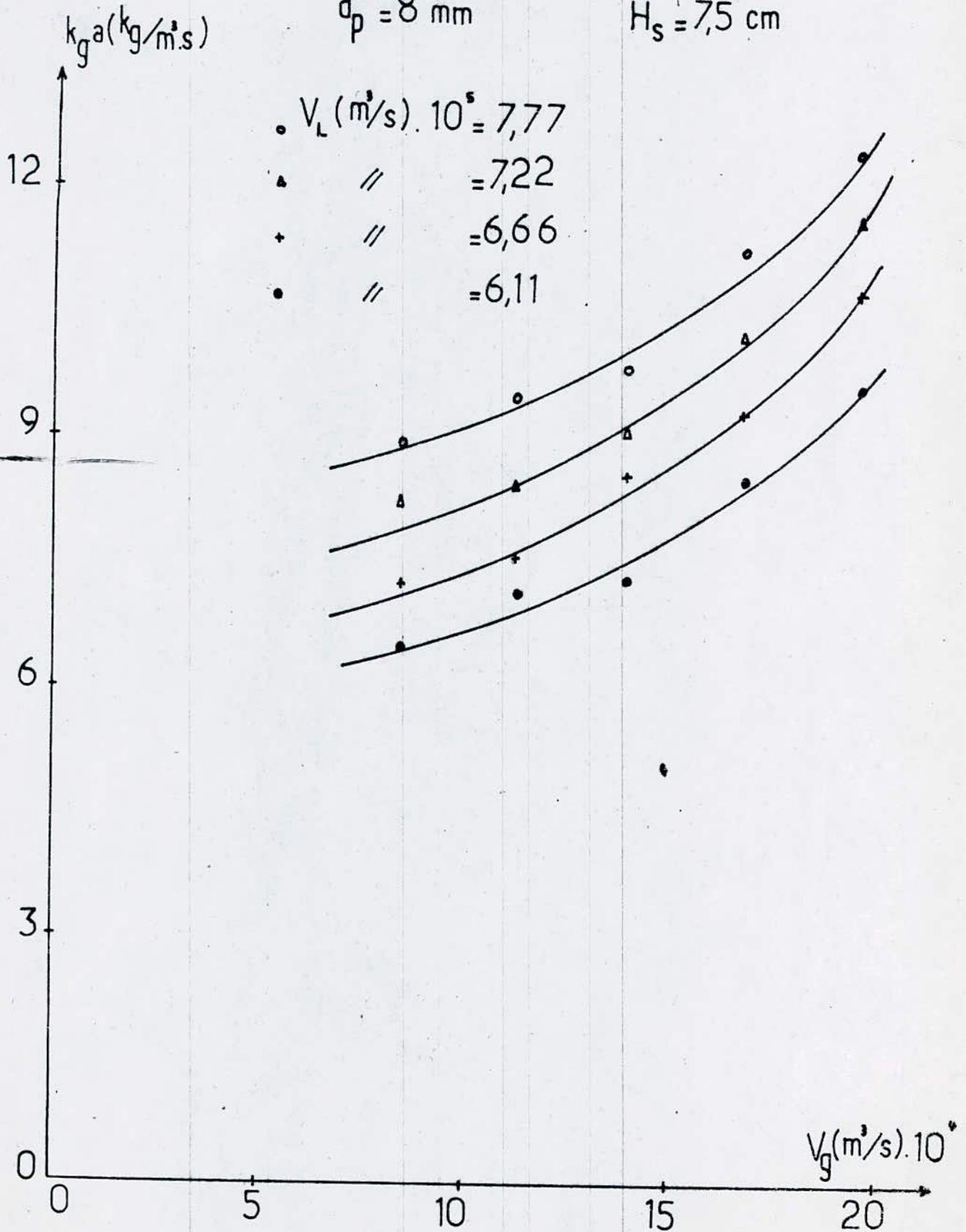
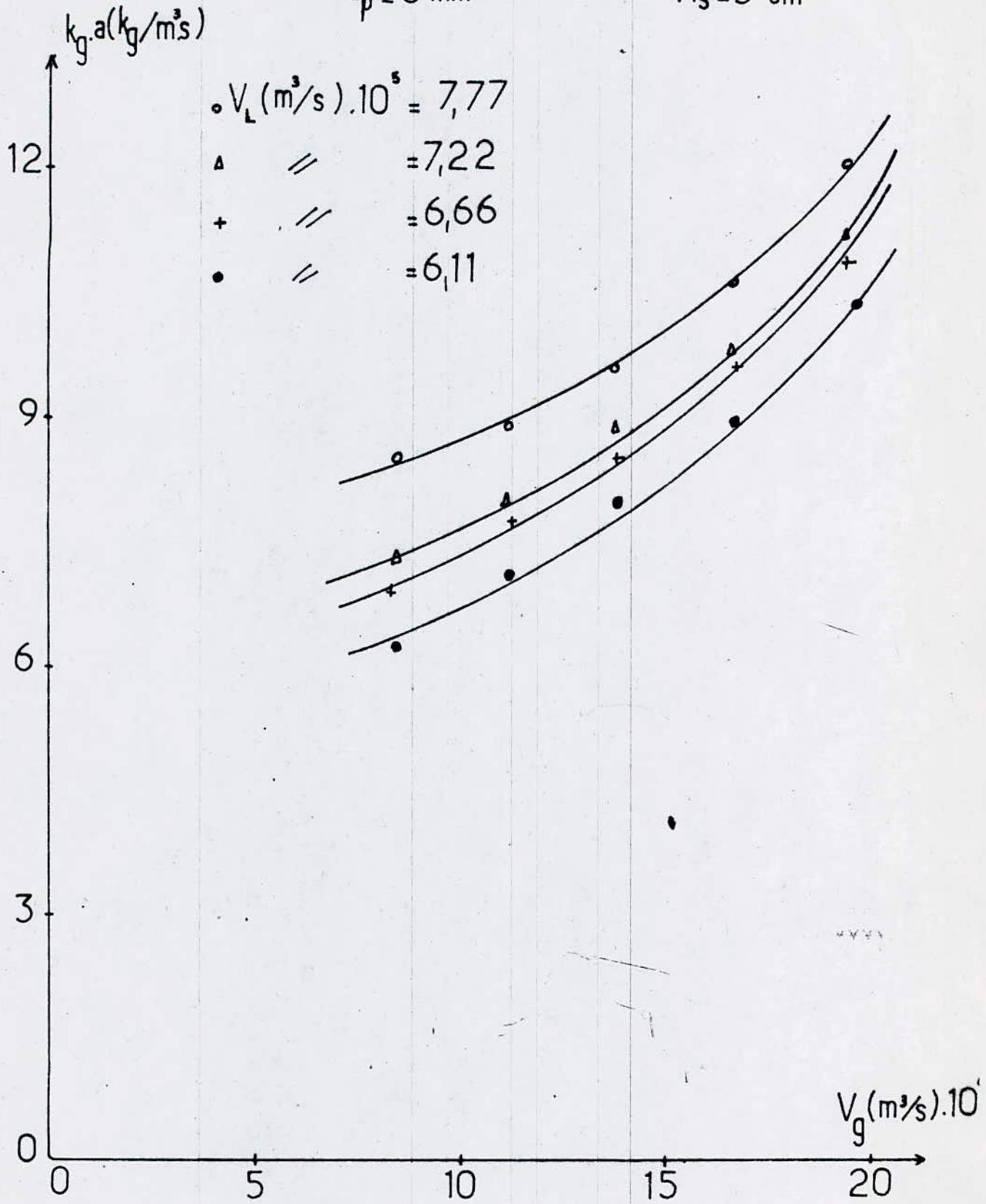


Figure-15

$d_p = 8 \text{ mm}$

$H_s = 5 \text{ cm}$



Figure_16

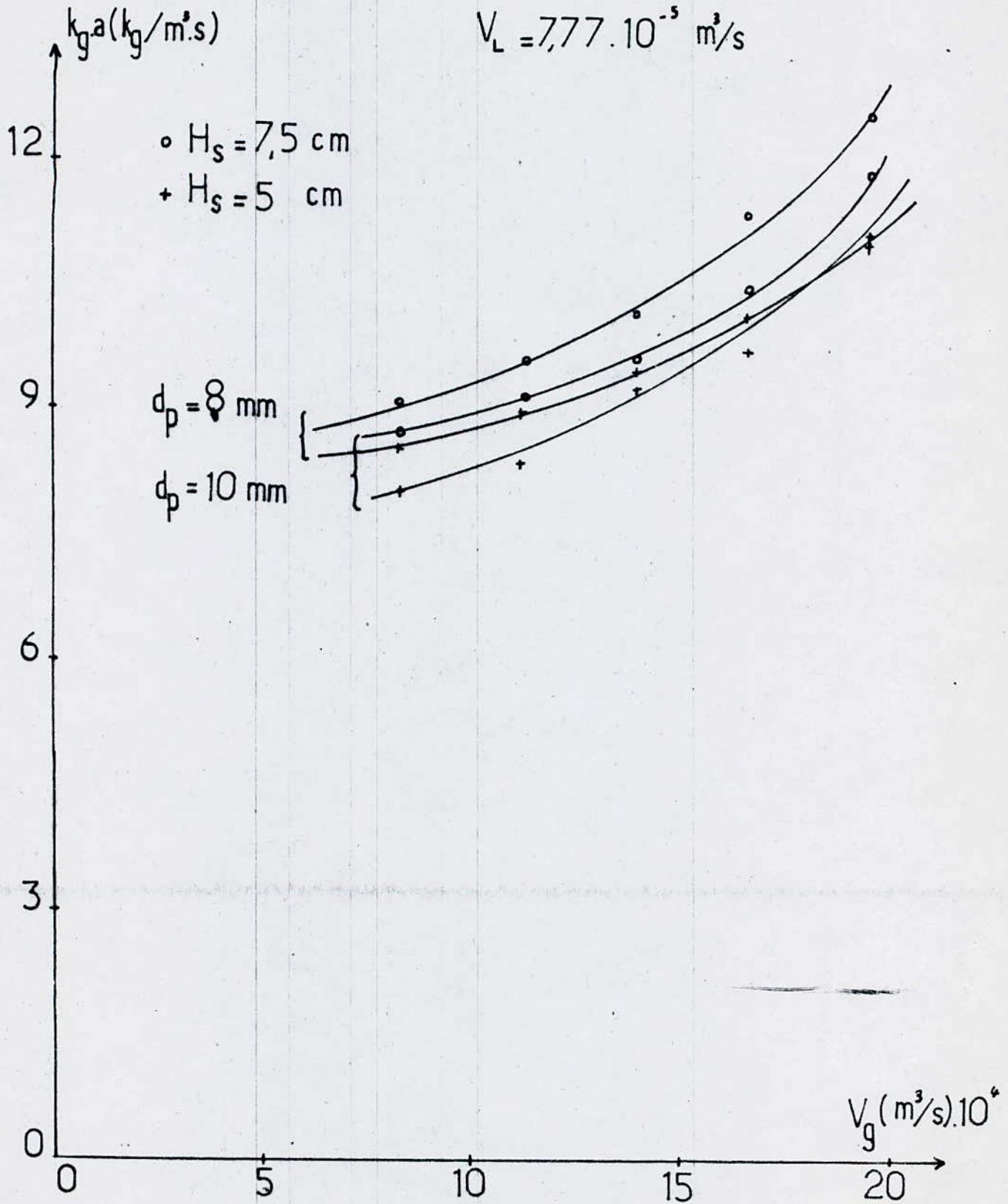


Figure -17

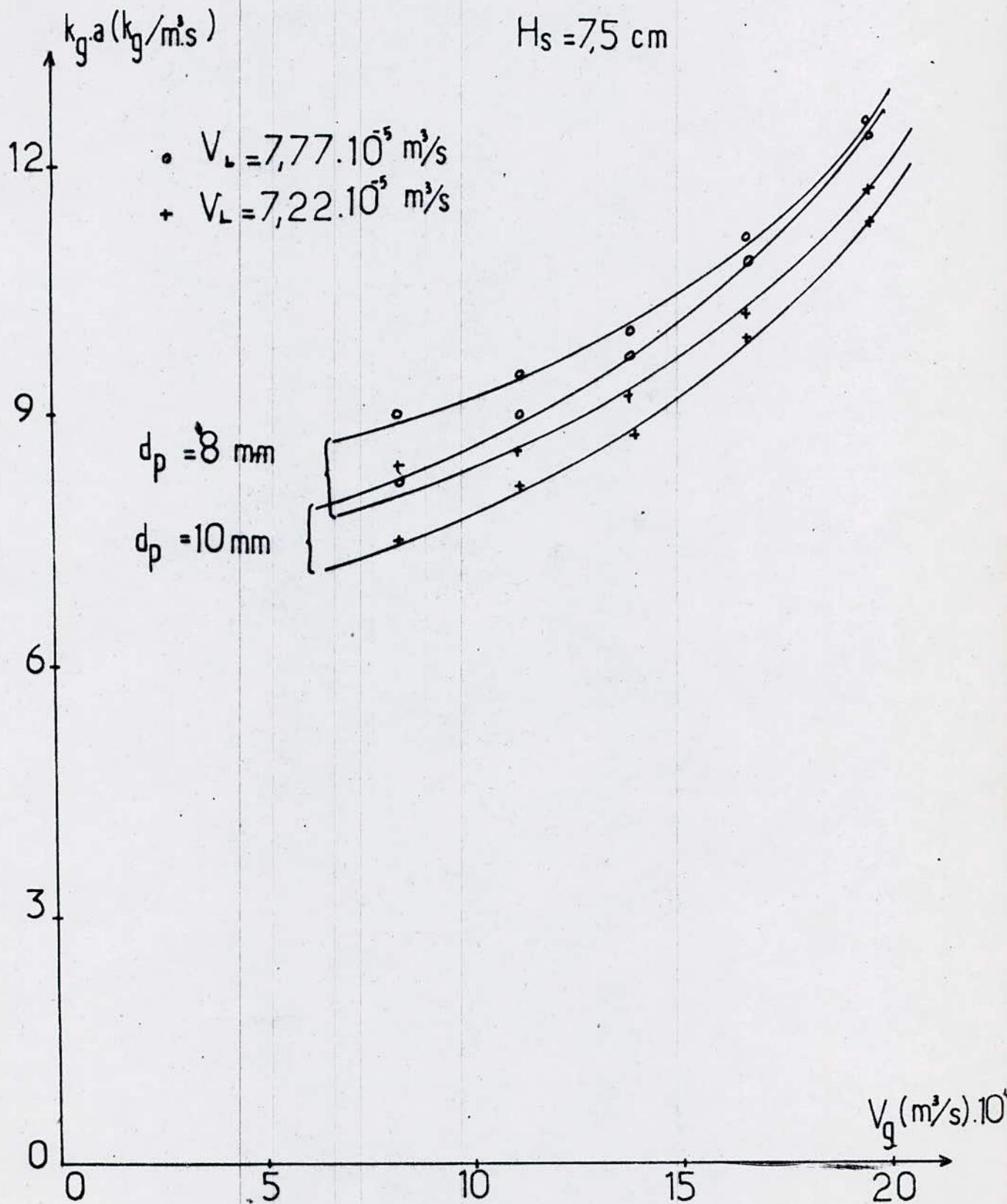
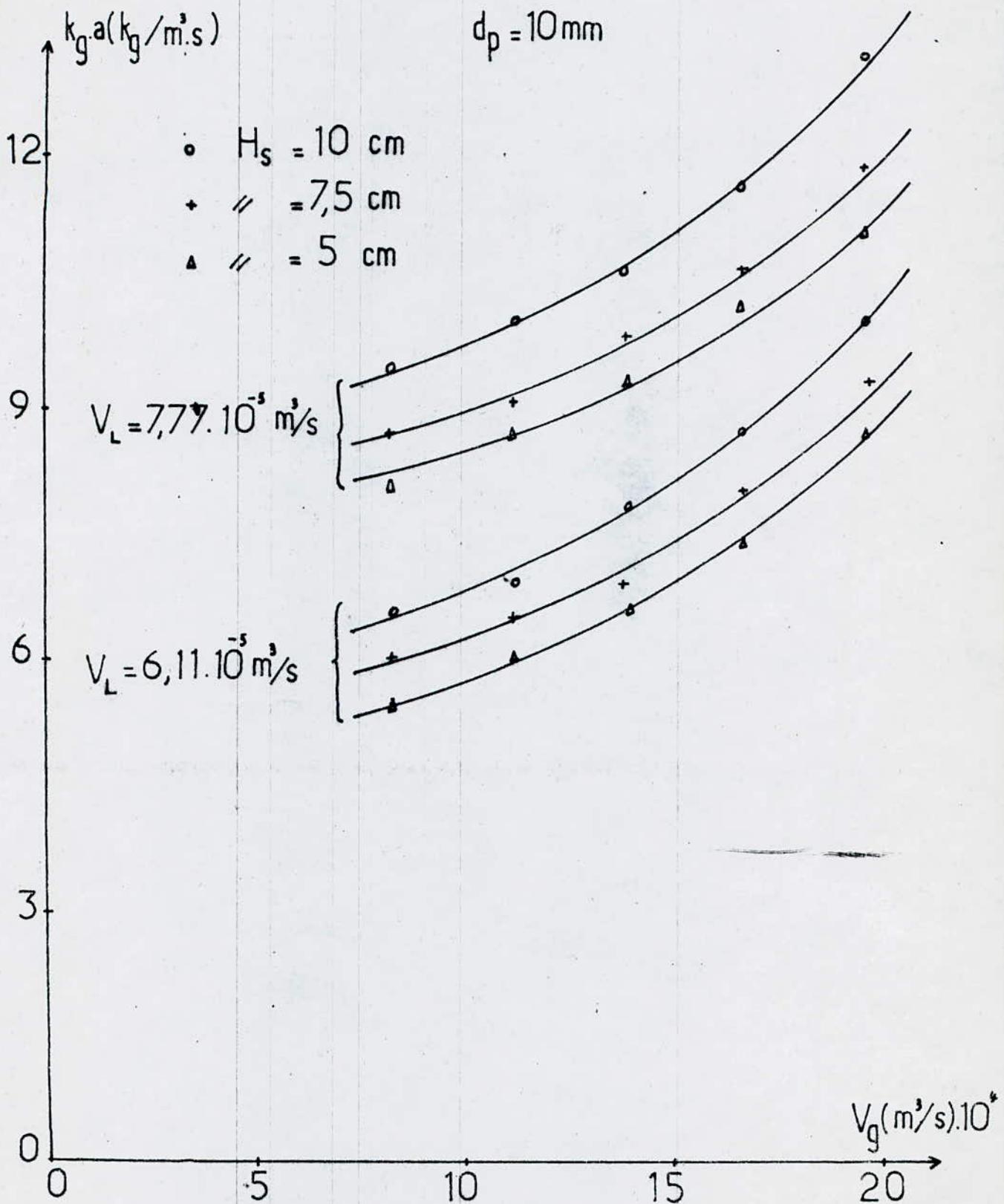


Figure-18



Bilan d'eau en phase gazeuse concernant le volume différentiel $S \cdot dh$ est le suivant .

$$G \cdot Y + k_g (Y_i - Y) \cdot dA = G (Y + dY)$$

Avec $dA = a \cdot S \cdot dh$ on a alors

$$k_g (Y_i - Y) \cdot a \cdot S \cdot dh = G \cdot dY$$

$$\int_0^{H_d} dh = \frac{1}{(k_g \cdot a) \cdot S} \cdot \int_{Y_e}^{Y_s} \frac{dY}{Y_i - Y}$$

En ayant $Y_i = \text{const.}$ on obtient

$$(k_g \cdot a) = \frac{(G/S)}{H_d} \cdot \ln \frac{Y_i - Y_e}{Y_i - Y_s}$$

$$\text{Avec } Y = \frac{M.\text{eau}}{M.\text{air}} \cdot \frac{P.\text{eau}}{P - P.\text{eau}} = 0,622 \cdot \frac{P.\text{eau}/t_g}{P - P.\text{eau}/t_g}$$

$$\text{Et } Y_i = \frac{M.\text{eau}}{M.\text{air}} \cdot \frac{P.\text{eau}/t_1}{P - P.\text{eau}/t_1}$$

on supposant que $t_1 = t_i$

3 : Allures des courbes .

Le coefficient de transfert de matière liquide - gaz augmente avec l'augmentation du débit de gaz pour un même débit de liquide . On remarque aussi que ce coefficient est fortement influencé par les dimensions des balles , et qu'il augmente quand le diamètre de celles-ci diminue ceci est dû surtout à l'augmentation de la surface de contact liquide-gaz et à la cinétique de transfert qui croit de plus en plus .

Pour une hauteur statique du lit supérieur, le coefficient de transfert de masse augmente avec l'acrosissement des débits de gaz et de liquide ce qui est conforme à la théorie .

Notons que l'augmentation du coefficient de transfert de matière nous renseigne sur l'augmentation de l'efficacité .

CONCLUSION :

Le coefficient de transfert de matière liquide-gaz dans un lit fluidisé triphasique est fortement influencé par les dimensions des particules , augmente avec la diminution du diamètre de celles-ci .

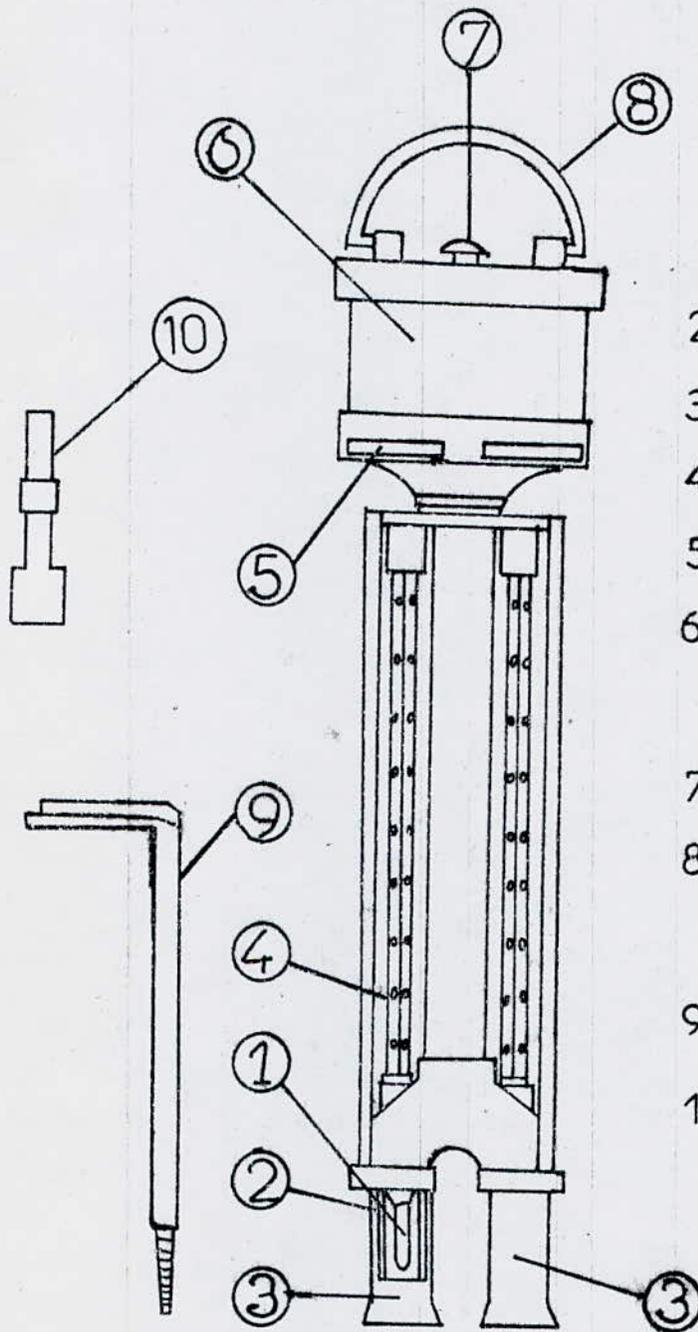
La hauteur statique du lit , le débit de gaz et le débit liquide ont un rôle important dans le phénomène d'échange de matière .

L'augmentation de ces paramètres a pour résultat d'accroître la surface de contact liquide - gaz. Ce qui donne un bon coefficient de transfert de matière .

Nous avons relevé certaines erreurs expérimentales de lecture , qui sont principalement causées par l'appareillage , en locurence le manometre à eau et la regle pour la mesure de la hauteur dynamique .

ANNEXE

Figure.1_4. PSYCHNOMÈTRE D'ASSMANN



1. Bulbe sensible
2. Tube intérieur
3. Conduit
4. Thermomètre
5. Orifice d'aspiration
6. Ventilateur
d'aspiration
7. Bouton
8. Anneau de
suspension
9. Support métallique
10. Injecteur

TABLEAU DE CONVERSION POUR PSYCHOMETRE D'ASSMANN

Moisture Chart for Psychrometer.

T _w	Difference between Dry and Wet Bulb. t-t' (°C)																																				
	00	02	04	06	08	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120			
40	100	99	98	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	81	78	76	73	71																
39	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	80	78	75	73	71	69	67													
38	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	80	78	75	73	71	68	66	64	62											
37	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	80	77	75	72	70	68	66	64	62	60	58								
36	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	79	77	74	72	70	68	66	64	62	60	58	56	54						
35	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	89	87	86	85	84	83	82	79	77	74	72	69	67	65	63	61	59	57	55	53	52	50					
34	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	88	87	86	85	84	83	82	79	76	74	71	69	67	64	62	60	58	56	55	53	51	49	48	46			
33	100	99	97	96	95	94	93	92	91	90	88	87	86	85	84	83	81	79	76	73	71	68	66	64	62	60	58	56	54	52	50	49	47	46	44		
32	100	99	97	96	95	94	93	92	91	89	88	87	86	85	84	83	82	81	78	76	73	70	68	66	63	61	59	57	55	53	52	50	48	46	45	43	
31	100	99	97	96	94	93	92	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	78	75	73	70	68	65	63	61	59	57	55	53	51	49	47	46	44	43		
30	100	99	97	96	94	93	92	90	89	88	86	85	84	83	82	80	77	75	72	69	67	65	62	60	58	56	54	52	50	48	47	45	43	42			
29	100	99	97	96	94	93	91	90	89	87	86	85	84	83	82	81	80	77	74	72	69	66	64	62	60	57	55	53	51	49	48	46	44	43	41		
28	100	99	97	96	94	93	91	90	89	87	86	85	83	82	81	80	77	74	71	68	66	63	61	59	57	55	53	51	49	47	45	43	42	40			
27	100	98	97	95	94	93	91	90	88	87	86	84	83	82	81	80	77	73	71	68	65	63	60	58	56	54	52	50	48	46	44	43	41	39			
26	100	98	97	95	94	92	91	90	88	87	85	84	83	81	80	79	76	73	70	67	65	62	60	57	55	53	51	49	47	45	44	42	40	39			
25	100	98	97	95	94	92	91	89	88	86	85	84	83	81	80	78	75	72	69	67	64	62	59	57	54	52	50	48	46	44	43	41	39	38			
24	100	98	97	95	94	92	91	89	88	86	85	83	82	81	79	78	75	72	69	66	63	61	58	56	54	51	49	47	45	43	42	40	38	37			
23	100	98	97	95	93	92	90	89	87	86	84	83	82	80	79	78	74	71	68	65	63	60	58	55	53	51	48	46	44	42	41	39	37	36			
22	100	98	97	95	93	92	90	89	87	86	84	83	81	80	78	77	74	71	68	65	62	59	57	54	52	50	47	45	43	41	40	38	36	35			
21	100	98	97	95	93	92	90	88	87	85	84	82	81	79	78	77	73	70	67	64	61	58	56	53	51	49	46	44	42	40	39	37	35	33			
20	100	98	96	95	93	91	90	88	86	85	83	82	80	79	77	76	73	69	66	63	60	58	55	53	50	48	45	43	41	39	37	36	34	32			
19	100	98	96	95	93	91	89	88	86	85	83	81	80	78	77	76	72	69	65	62	59	57	54	51	49	47	44	42	40	38	36	34	33	31			
18	100	98	96	94	93	91	89	87	86	84	83	81	79	78	76	75	71	68	65	62	59	56	53	50	48	45	43	41	39	37	35	33	31	30			
17	100	98	96	94	92	91	89	87	85	84	82	80	79	77	76	74	71	67	64	61	58	55	52	49	47	44	42	40	38	36	34	32	30	28			
16	100	98	96	94	92	90	89	87	85	83	82	80	78	77	75	74	70	66	63	60	57	54	51	48	45	43	41	38	36	34	32	30	29	27			
15	100	98	96	94	92	90	88	86	85	83	81	79	78	76	74	73	69	65	62	59	55	52	50	47	44	42	39	37	35	33	31	29	27	25			
14	100	98	96	94	92	90	88	86	84	82	81	79	77	75	74	72	68	64	61	57	54	51	48	45	43	40	38	35	33	31	29	27	25	24			
13	100	98	96	94	92	90	88	86	84	82	80	78	76	75	73	71	67	63	60	56	53	50	47	44	41	39	36	34	32	29	27	25	24	22			
12	100	98	96	94	92	90	88	86	84	82	80	78	76	74	72	70	66	62	59	55	52	48	45	42	40	37	35	32	30	28	26	24	22	20			
11	100	98	95	93	91	89	87	85	83	81	79	77	75	73	71	69	65	61	57	54	50	47	44	41	38	35	33	30	28	26	24	22	20	18			
10	100	98	95	93	91	89	86	84	82	80	78	76	74	72	70	69	64	60	56	52	49	45	42	39	36	33	31	28	26	24	22	20	18	16			
9	100	98	95	93	90	88	86	84	81	79	77	75	73	71	69	68	63	59	55	51	47	44	40	37	34	32	29	26	24	22	20	18	16	14			
8	100	97	95	92	90	88	85	83	81	79	76	74	72	70	68	66	62	57	53	49	46	42	39	35	32	29	27	24	22	19	17	15	13	11			
7	100	97	95	92	90	87	85	82	80	78	76	73	71	69	67	65	60	56	52	48	44	40	37	33	30	27	24	22	19	17	15	13	11	9			
6	100	97	94	92	89	87	84	82	79	77	75	72	70	68	66	64	59	54	50	46	42	38	34	31	28	25	22	19	17	15	12	10	8	6			
5	100	97	94	91	89	86	84	81	79	76	74	71	69	67	65	63	57	53	48	44	40	36	32	29	25	22	19	17	14	12	10	7	5	3			
4	100	97	94	91	88	86	83	80	78	75	73	70	68	66	63	61	56	51	46	42	37	33	30	26	23	20	17	14	11	9	7	4	2				
3	100	97	94	91	88	85	82	79	77	74	72	69	67	64	62	60	54	49	44	39	35	31	27	23	20	17	14	11	8	6	5	1					
2	100	97	93	90	87	84	81	78	76	73	70	68	65	63	60	58	52	47	42	37	33	28	24	21	17	14	11	8	5	2							
1	100	97	93	90	87	83	80	77	75	72	69	66	64	61	59	56	50	44	39	34	30	25	21	17	14	10	7	4	1								
0	100	96	93	89	86	83	80	76	73	70	67	65	62	59	57	54	48	42	37	31	27	22	18	14	10	7	4	1									
-1	100	96	82	89	85	82	79	75	72	69	66	63	60	57	55	52	45	39	34	29	24	19	14	10	7	3											
-2	100	96	82	88	85	81	78	74	71	68	64	61	58	55	52	50	43	37	31	25	20	15	11	7	3												
-3	100	96	82	88	84	80	77	73	69	66	63	59	56	53	50	47	40	34	27	22	16	11	7	2													
-4	100	96	81	87	83	79	75	71	68	64	61	57	54	51	47	44	37	30	24	18	13	7	2														
-5	100	95	81	87	82	78	74	70	66	62	59	55	52	48	45	42	34	27	20	14	8	3															
-6	100	95	80	86	81	77	72	68	64	60	56	53	49	45	42	39	31	23	16	10	5																
-7	100	95	80	85	80	75	71	67	62	58	54	50	46	42	39	35	27	19	12	5																	
-8	100	95	80	84	79	74	69	64	60	55	51	47	43	39	35	32	23	15	7																		
-9	100	94	80	83	78	73	67	63	57	53	48	44	40	36	32	28	18	10	2																		
-10	100	94	80	82	76	71	65	60	55	50	45	40	36	32	27	23	13	4																			

Détermination de la porosité .

On a utilisé deux types de balles de 8 et 10 mm de diamètre , pour déterminer la porosité du lit pour chaque type de garnissage on a .

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

V_t : Volume du lit

V_p : Volume des particules

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

$V_t = H_d \cdot \Omega = H_d \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$
 n : Nombre de particules dans V_t

d : Diametre de particule

V_p : Volume de particule

Ω : Section de la colonne

D : Diametre de la colonne

H_d : Hauteur dynamique

Pour $d_p = 10$ mm : $D = 51$ mm

$H_s = 5$ cm $n = 116$ particules

$H_s = 7.5$ cm $n = 174$ particules

$H_s = 10$ cm $n = 232$ particules

La porosité sera alors .

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

Pour $d_p = 8$ mm :

$H_s = 5$ cm $n = 237$ particules

$H_s = 7,5$ cm $n = 355$ particules

$H_s = 10$ cm $n = 474$ particules

On aura .

$$\epsilon = 1 - \frac{n}{H_d} \cdot 0,131 \cdot 10^{-3}$$

Tableau (1)

 $H_s = 10 \text{ cm}$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $P = 760,3 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	
	$t_L (^\circ\text{C})$	16,4	16,5	16,5	16,5	16,6	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,5	16	15,6	16	15,8
		$t_m (^\circ\text{C})$	7	6,6	6,6	7	6,8
		$\varphi_e (\%)$	19	21	21	22	21
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	21,95	22,91	22,91	24,63	23,21
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	15,8	16,4	16,4	16,4	16,6
		$t_m (^\circ\text{C})$	15	15,8	15,8	15,8	16
		$\varphi_s (\%)$	92	94	94	94	94
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	102,98	109,45	109,45	109,45	110,88
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	32	36	42	45	49
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	1,13	1,18	1,35	1,48	1,77
		$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	116,15	117,61	117,61	117,61	118,73
	$\text{kg.a} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	9,51	10,01	10,75	11,74	13,34	

Tableau (2)

 $H_s = 10 \text{ cm}$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $P = 760,6 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,22	7,22	7,22	7,22	7,22	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18,2	18,2	18,4	18,4	18,5	
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entree	$t_g (^\circ\text{C})$	16	16	16	16	15,8
		$t_m (^\circ\text{C})$	6,5	7	6,5	6,5	6,8
		$\varphi_e (\%)$	18	22	18	18	21
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	20,13	24,62	20,13	23,20	23,20
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,8	17,2	17,6	17,8	17,8
		$t_m (^\circ\text{C})$	15,8	16,4	17,2	17,4	17,6
		$\varphi_s (\%)$	90	92	96	96	98
$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$		107,41	112,71	120,77	122,34	124,94	
	$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	29	33	36	40	44	
	$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	105	108	120	134	145	
	$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	130,13	130,13	132,52	132,52	133,14	
	$kg_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	8,78	9,36	10,01	11,34	12,76	

Tableau (3)

 $H_s = 10 \text{ cm}$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $P = 760,3 \text{ mm Hg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18	18	18	18,1	18,1	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16	16	16,5	16	16,7
		$t_m (^\circ\text{C})$	6,5	6,5	7	6,5	7,2
		$\varphi_e (\%)$	18	18	19	18	20
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	20,14	20,14	21,95	20,14	23,41
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	17,2	17,6	17,6	17,8	18
		$t_m (^\circ\text{C})$	15,8	16,8	17	17,4	17,7
		$\varphi_s (\%)$	87	92	94	96	97
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	106,51	115,69	118,25	122,39	125,28
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	25	31	34	38	40
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-3}$	0,98	1,03	1,11	1,22	1,35
		$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	129,34	129,34	129,34	130,17	130,17
		$kg_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	7,96	8,74	9,34	10,17	11,48

Tableau (4)

 $H_s = 10 \text{ cm}$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $P = 760,2 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	
	$t_L (^\circ\text{C})$	17	17,2	17,2	17,2	17,4	
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	14	14	14,5	14,5	14
		$t_m (^\circ\text{C})$	5,5	5,5	6	6	5,5
		$\varphi_e (\%)$	21	21	22	22	21
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	20,66	20,66	22,36	22,36	20,66
		$t_g (^\circ\text{C})$	14,4	15,2	15,8	16,4	16,6
		$t_m (^\circ\text{C})$	13,4	14,4	15,2	16	16,4
		$\varphi_s (\%)$	90	92	94	94	98
	$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	91,92	99,05	105,28	111,83	117,20	
	$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	23	28	31	34	36	
	$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,91	0,98	1,05	1,17	1,29	
	$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	121,13	122,47	122,47	122,47	124,51	
$kg_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	6,58	6,98	7,93	8,75	10,02		

Tableau (5)

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

$d_p = 10 \text{ mm}$

$P = 760,5 \text{ mm Hg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18	18,1	18,1	18,4	18,5	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entrée	$t_g (^\circ\text{C})$	15,8	15,6	15,6	15,6	15,8
		$t_m (^\circ\text{C})$	6,8	6	5,9	6,2	6,4
		$\varphi_e (\%)$	21	17	16	20	19
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	23,21	18,53	17,44	21,81	22,09
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,9	17,6	17,8	18,1	18,1
		$t_m (^\circ\text{C})$	16,1	17	17,4	17,7	17,9
		$\varphi_s (\%)$	92	94	96	96	98
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	110,56	118,23	122,35	124,73	127,38
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	22	24	28	30	31
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,70	0,85	1,03	1,28	1,53
		$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	129,33	130,76	130,76	133,13	134,34
	$k_g a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	8,75	9,11	9,97	10,78	11,98	

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

$d_p = 10 \text{ mm}$

$P = 760,6 \text{ mm Hg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,22	7,22	7,22	7,22	7,22	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18,2	18,4	18,4	18,5	18,5	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,83	1,05	1,23
	Entrée	$t_g (^\circ\text{C})$	15	16,2	16,2	16,1	16,1
		$t_m (^\circ\text{C})$	65	67	67	71	71
		$\varphi_e (\%)$	23	18	18	22	22
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	24,14	20,39	24,14	24,78	24,78
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	17	17,8	18,2	18,4	18,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	16,2	17	17,8	18	18,2
		$\varphi_s (\%)$	92	92	94	96	98
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	111,26	117,15	122,85	127,14	129,83
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	18	21	23	25	27
	$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,58	0,72	0,93	1,11	1,39	
	$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	130,13	132,49	132,49	133,57	133,57	
	$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	7,65	8,48	8,86	10,01	11,42	

Tableau (7)

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

$d_p = 10 \text{ mm}$

$P = 760,2 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	
	$t_L (^\circ\text{C})$	17,2	17,2	17,4	17,4	17,7	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	14	14	14,5	14,2	14,5
		$t_m (^\circ\text{C})$	5,5	5,5	5,5	5,7	5,5
		$\varphi_e (\%)$	21	21	18	21	18
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	20,66	20,66	18,29	20,93	18,29
		$t_g (^\circ\text{C})$	14	15,2	16	16,6	17
		$t_m (^\circ\text{C})$	13	14,4	15,4	16	16,8
		$\varphi_s (\%)$	90	92	94	94	98
	$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	89,53	99,05	106,65	110,89	118,72	
	$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	16	18	19	21	22	
	$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,52	0,63	0,78	1,02	1,25	
	$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	122,47	122,47	124,51	124,51	126,97	
$kg_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	7,19	7,61	8,48	9,32	10,75		

Tableau (8)

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

$d_p = 10 \text{ mm}$

$P = 760,5 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18	18	18,1	18,2	18,5	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entrée	$t_g (^\circ\text{C})$	15,6	15,6	16	16	16
		$t_m (^\circ\text{C})$	64	64	68	7	68
		$\varphi_e (\%)$	20	20	21	22	21
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	21,81	21,81	23,50	24,62	23,50
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,6	17,4	18	18,2	18,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	15,6	16,8	17,4	17,8	18,2
		$\varphi_s (\%)$	90	94	94	96	98
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	106,05	116,72	121,30	129,83	129,85
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	15	16	18	20	21
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,46	0,57	0,68	0,88	1,07
	$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	129,31	129,31	130,15	131,10	134,06	
	$\text{kg a} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	6,21	6,59	6,97	8,09	9,35	

Tableau (9)

$H_s = 5 \text{ cm}$

$d_p = 10 \text{ mm}$

$P = 760,3 \text{ mm Hg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	
	$t_L (^\circ\text{C})$	16,4	16,4	16,5	16,6	16,6	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	14,5	14,5	14,5	14,2	14,5
		$t_m (^\circ\text{C})$	6	5,5	5,5	5,7	6
		$\varphi_e (\%)$	22	18	18	21	22
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	22,33	18,30	18,30	20,6	22,33
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	15,8	16,4	16,4	16,8	17,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	15,2	15,8	16	16,4	16,8
		$\varphi_s (\%)$	94	94	94	96	96
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	105,24	109,38	109,38	114,72	117,78
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	21	24	27	31	33
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,30	0,44	0,55	0,73	1,40
		$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	116,33	116,33	117,71	118,37	118,37
$\text{kg} \cdot a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	7,91	8,68	9,37	10,31	11,21		

Tableau (10)

$H_s = 5 \text{ cm}$

$d_p = 10 \text{ mm}$

$P = 760,3 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,22	7,22	7,22	7,22	7,22	
	$t_L (^\circ\text{C})$	17,8	18	18,4	18,4	18,5	
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entree	$t_g (^\circ\text{C})$	15	15,5	15,5	15,6	15,6
		$t_m (^\circ\text{C})$	65	7	7	6	6
		$\varphi_e (\%)$	23	19	19	17	17
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	24,14	20,60	20,60	18,54	18,54
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,6	17,4	20	17,8	18
		$t_m (^\circ\text{C})$	15,6	16,8	19,6	17,4	17,8
		$\varphi_s (\%)$	90	94	96	96	98
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	106,09	116,67	120,75	122,37	126,54
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	18	21	24	27	30
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,25	0,30	0,43	0,55	0,71
		$Y_1 (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	127,18	129,19	132,10	132,11	133,23
	$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	6,92	7,51	8,29	9,32	10,59	

Tableau(11)

 $H_s = 5 \text{ cm}$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $P = 760,5 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18,1	18,1	18,2	18,4	18,4	
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16	16,2	16	16,4	16,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	6,8	7,2	7	6,8	7
		$\varphi_e (\%)$	21	22	22	18	19
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	23,47	24,96	24,55	20,59	21,75
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	17	17,8	18,2	18,2	18,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	16,2	17,4	17,6	17,8	18
		$\varphi_s (\%)$	92	96	94	96	98
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	111,21	122,33	122,84	125,53	128,13
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	16	18	21	24	26
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,20	0,26	0,31	0,47	0,60
		$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	129,71	130,12	131,13	133,02	133,02
	$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	5,72	6,59	7,38	8,41	9,50	

Tableau (12)

 $H_s = 5 \text{ cm}$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $P = 760,5 \text{ mm Hg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18,4	18,4	18,4	18,4	18,5	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,4	16,3	16,1	16,4	16,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	7	7,4	7,1	7	7
		$\varphi_e (\%)$	19	23	22	19	19
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	21,74	26,19	24,78	21,74	21,74
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	17,8	17,8	18	18,1	18,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	16,8	17,2	17,6	17,8	18
		$\varphi_s (\%)$	91	94	96	96	98
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	115,80	119,71	123,87	124,72	128,13
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	13	16	18	21	22
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,15	0,19	0,28	0,37	0,50
		$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	133,41	133,41	133,41	133,41	134,72
	$kg_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	5,48	6,01	6,79	7,33	8,75	

Tableau (13)

 $H_s = 7,5 \text{ cm}$ $d_p = 8 \text{ mm}$ $P = 760,7 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	
	$t_L (^\circ\text{C})$	16,5	16,5	16,6	16,7	16,8	
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entree	$t_g (^\circ\text{C})$	16,4	16,4	16,4	16,8	17,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	7	7	7,2	7	7,8
		$\varphi_e (\%)$	19	19	22	17	21
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	21,82	21,82	25,61	19,85	25,37
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,6	18,4	17	17	18
		$t_m (^\circ\text{C})$	14,8	16,8	15,6	16	17
		$\varphi_s (\%)$	83	85	87	90	91
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	97,67	99,35	105,09	108,80	117,30
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	28	34	37	41	42
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,55	0,67	0,86	1,05	1,33
		$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	117,26	117,26	118,33	119,41	120,50
	$kg.a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	9,01	9,53	9,98	11,34	12,50	

Tableau (14)

 $H_s = 7,5 \text{ cm}$ $d_p = 8 \text{ mm}$ $P = 760 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,22	7,22	7,22	7,22	7,22	
	$t_L (^\circ\text{C})$	19	19	19,2	19,2	19,3	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entrée	$t_g (^\circ\text{C})$	18,2	18,2	18,7	18,4	18,6
		$t_m (^\circ\text{C})$	82	82	87	84	84
		$\varphi_e (\%)$	20	20	21	20	20
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	25,72	25,72	27,94	26,05	26,38
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	18,8	18,8	19,2	19,4	19,8
		$t_m (^\circ\text{C})$	16	16,8	17,8	18,6	19
		$\varphi_s (\%)$	75	82	87	93	93
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	101,47	111,12	121,15	131,28	134,61
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	26	30	32	36	38
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,49	0,61	0,77	0,90	1,11
		$Y_1 (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	138,15	138,15	139,41	139,41	140,63
	$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	8,41	8,53	9,18	10,33	11,75	

Tableau (15)

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

$d_p = 8 \text{ mm}$

$P = 760 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18	18,3	18,3	18,4	18,6	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16	16,2	16,4	18	17
		$t_m (^\circ\text{C})$	6,6	6,6	7	8	7,4
		$\varphi_e (\%)$	18	18	19	19	20
		$Y_e \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	20,12	20,36	21,76	21,19	23,87
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,4	17	17,6	17,8	18,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	14	14,8	16,6	17	18
		$\varphi_s (\%)$	77	79	90	93	96
		$Y_s \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	89,41	95,39	113,16	118,51	127,28
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	23	26	29	32	34
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,42	0,51	0,66	0,75	0,92
		$Y_i \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}} \right) \cdot 10^4$	129,37	131,18	131,18	133,35	135,11
	$kg_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$	7,45	7,69	8,67	9,35	10,88	

Tableau (16)

$H_s = 7,5 \text{ cm}$

$d_p = 8 \text{ mm}$

$p = 760,3 \text{ mmHg}$

Liquide		$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11		
		$t_L (^\circ\text{C})$	18,5	18,5	18,6	18,7	18,8		
GAZ		Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7	
			$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44	
			$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23	
		Entree	$t_g (^\circ\text{C})$	18	18,5	18,5	18,6	19	
			$t_m (^\circ\text{C})$	8,4	8	8	8,4	8,8	
			$\varphi_e (\%)$	23	17	17	20	21	
			$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	29,26	22,33	26,37	27,15	28,43	
		Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	18,8	18,8	19,2	19,2	19,4	
			$t_m (^\circ\text{C})$	15,8	17	18	18,4	18,8	
			$\varphi_s (\%)$	74	84	89	93	95	
			$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	100,08	113,88	123,90	129,69	134,13	
				$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	20	23	26	30	32
				$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,35	0,45	0,47	0,63	0,77
				$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	133,13	133,13	134,71	135,42	136,73
		$\text{kg.a} (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	6,57	7,29	7,36	8,74	9,75		

Tableau (17)

$H_s = 5 \text{ cm}$

$d_p = 8 \text{ mm}$

$P = 760,9 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	
	$t_L (^\circ\text{C})$	19	19,1	19,2	19,2	19,2	
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entree	$t_g (^\circ\text{C})$	18,8	19	19	19,2	19,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	9,4	9	8,4	8,6	8,6
		$\varphi_e (\%)$	25	22	18	19	19
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	33,43	29,73	24,38	26,02	26,02
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	19,4	19,6	19,6	19,6	19,6
		$t_m (^\circ\text{C})$	18,4	19	19	19	19,4
		$\varphi_s (\%)$	91	95	95	95	98
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	128,25	135,74	135,74	135,74	140,13
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	22	26	28	31	32
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,38	0,46	0,70	0,88	1,10
		$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	137,19	138,73	139,73	140,35	140,35
	$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	8,58	8,98	9,70	10,71	12,11	

Tableau (18)

 $H_s = 5 \text{ cm}$ $d_p = 8 \text{ mm}$ $P = 760,6 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	7,22	7,22	7,22	7,22	7,22	
	$t_L (^\circ\text{C})$	17,2	17,4	17,4	17,5	17,7	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	17,4	17,6	17,8	18	18
		$t_m (^\circ\text{C})$	7,4	8	7,6	7,8	7,4
		$\varphi_e (\%)$	18	21	17	18	16
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	21,99	25,94	21,25	22,81	20,35
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	17,6	18	17,8	18	18,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	16,6	17	17	17,4	17,8
		$\varphi_s (\%)$	91	91	92	94	94
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	114,34	117,31	117,15	121,29	122,66
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	18	21	23	26	28
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,33	0,43	0,51	0,74	0,86
		$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	122,83	124,51	124,51	125,73	126,81
	$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	7,35	8,09	8,99	9,97	11,36	

Tableau (19)

 $H_s = 5 \text{ cm}$ $d_p = 8 \text{ mm}$ $P = 760,6 \text{ mmHg}$

Liquide	$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	
	$t_L (^\circ\text{C})$	18,4	18,6	18,9	18,8	18	
GAZ	Entrée	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	1,05	1,23
	Entrée	$t_g (^\circ\text{C})$	17,8	18,2	18,2	18,2	18,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	8,4	8,4	8,8	8,6	8,6
		$\varphi_e (\%)$	22	21	23	23	23
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	27,59	27,02	29,57	29,57	29,57
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	18,4	18,8	19	19	19,2
		$t_m (^\circ\text{C})$	17,8	18,4	18,6	18,6	19
		$\varphi_s (\%)$	94	96	96	96	98
		$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	124,45	130,41	132,02	132,02	136,63
		$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	21	23	25	27	30
		$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,16	0,18	0,21	0,23	0,25
		$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	132,15	134,09	136,17	135,79	136,79
	$\text{kg a} (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	6,98	7,82	8,59	9,70	10,96	

Tableau (20)

$H_s = 5 \text{ cm}$

$d_p = 8 \text{ mm}$

$P = 760,2 \text{ mmHg}$

Liquide		$V_L (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^5$	6,11	6,11	6,11	6,11	6,11
		$t_L (^\circ\text{C})$	17,2	17,2	17,4	17,7	17,7
GAZ	Entree	$V_g (\text{m}^3/\text{h})$	3	4	5	6	7
		$V_g (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^4$	8,33	11,11	13,88	16,66	19,44
		$G/S (\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}})$	0,53	0,70	0,87	10,5	12,3
	Sortie	$t_g (^\circ\text{C})$	16,2	16,4	16,8	17	17
		$t_m (^\circ\text{C})$	6,2	6,4	6,8	6,8	7
		$\varphi_e (\%)$	15	16	17	16	17
		$Y_e (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	16,98	18,38	20,03	19,04	20,27
		$t_g (^\circ\text{C})$	17,7	18,7	18,5	18,9	18,4
		$t_m (^\circ\text{C})$	16,4	17,6	17,8	18,2	17,8
		$\varphi_s (\%)$	88	90	93	94	94
	$Y_s (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	102,37	113,13	118,48	122,90	124,51	
	$H_d (\text{m}) \cdot 10^2$	15	17	20	21	22	
	$\Delta P (\text{Pa}) \cdot 10^{-2}$	0,20	0,28	0,33	0,50	0,62	
	$Y_i (\frac{\text{kg eau}}{\text{kg air}}) \cdot 10^4$	122,31	122,31	124,12	126,02	126,02	
$kg_a (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}})$	6,23	7,17	8,01	9,02	10,52		

NOMENCLATURE

Les symboles des paramètres utilisés sont les suivants .

- A - Surface d'échange de matière gaz - liquide : m
- a - aire spécifique m^2 / m^3
- d - diamètre de particule : m
- D - diamètre de la colonne : m
- G - débit massique de l'air sec - kg / s
- K_s - Hauteur statique du lit : m
- H_d - Hauteur dynamique du lit : m
- K_g - Coefficient d'échange de matière global : $\text{kg} / \text{s} \cdot \text{m}^2$
- k_g - Coefficient d'échange de matière en phase gazeuse : $\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$
- $k_g : a$ - Coefficient de transfert de matière volumétrique en phase gazeuse .
- M - Masse molaire - kg
- L - débit massique du liquide : kg / s
- P - Pression atmosphérique - Pa :
- P_{eau} - Pression partielle de l'eau : Pa .
- P_{eau} - pression de vapeur saturante d'eau à température déterminée : Pa .
- S - Surface de la section droite de la colonne - m
- t_i - Température à l'interface gaz - liquide : °C
- t_g - Température du gaz (thermomètre sec) °C
- t_l - Température du liquide : °C
- Y_e - Humidité absolue de l'air à l'entrée : $\text{kg} \text{ eau} / \text{kg} \text{ air}$
- Y_i - Humidité absolue de l'air à l'interface : $\text{kg} \text{ eau} / \text{kg} \text{ air}$

Y_s - Humidité absolu de l'air à la sortie : $k_g \text{ eau} / k_g \text{ air}$

ϕ - Humidité relative de l'air : %

ρ_g - Masse volumique du gaz - k_g / m^3

ρ_s - Masse volumique des particules - k_g / m^3

ϵ - Porosité du lit : %

μ - Viscosité de l'air - Pa . s

ϕ - Sphéricité des particules

Re - Nombre de REYNOLDS /

Sh - Nombre de SHERWOOD

Sc - Nombre de SCMIDT

BIBLIOGRAPHIE

- 1) - G . WILD , M . SABERIAN , J - L . SCHWARZ , J . C . CHARPENTIER .
International chemical engineering , 24 , 4 , 639 - 678 , (1984) .
- 2) - R . E . TREYBAL , Mass transfert operations .
Ed . Mc GRAW - HILL , (1968) .
- 3) - W . Mc CABE , J , C . SMITH , Units operation of chemical engineering .
Ed . Mc GRAW - HILL , (1976) .
- 4) - M . KITO , Y . KAYANIA , T . SAKAI , S . SUGIYAMA .
International chemical engineering , 16 , 4 , 710 , (1976) .
- 5) - P . WUITHIER , Raffinage et genie - chimique ; tome : 1 , I . F . P .
I . F . P , (1972) .
- 6) - D . C . ARTERS , L . S . FAN , Chemical engineering science .
41 , 1 , 107 - 115 , (1986) .
- 7) - R . H . PERRY , C . H . CHILTON , Chemical engineering handbook .
Ed . Mc GRAW - HILL , (1973) .
- 8) - M . HADJADJ , Projet de fin d'étude , proposé par M . A . CIESLAK .
E . N . P . A , Janvier , (1987) .
- 9) - W . L . BADJER , J . T . BANCHERO , Introduction to chemical engineering .
Ed . Mc GRAW - HILL , (1955) .
- 10) - LIANG - SHINFAN , S . G . HWANG , A . MATSURA .
A . I . Ch . E SERIES , 80 , 234 , 91 - 97 , (1984) .
- 11) - H . BRUSSET , Technique de l'ingénieur , tome : 2 , J . 2510 .

