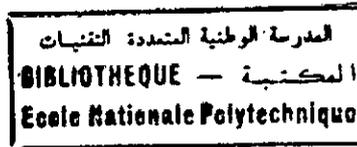


Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

M0016/95B

Département de Génie Chimique



THESE

présentée pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Par

BENSEBIA Bensaber

Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

**Contribution à l'étude de l'hydrodynamique
de l'Absorbeur à Contact Turbulent**

Proposée par : M. A. CIESLACK

Dirigée par : Mme F. BENTAHAR

Soutenu le 05 Juin 1995 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------|--------------------|------------------------------------|
| Président : | M. C.E. CHITOUR | Professeur (E.N.P.) |
| Examineurs : | Melle N. BENNANI | Chargée de cours (E.N.P.) |
| | Melle A. BENSMAILI | Maître de Conférences (U.S.T.H.B.) |
| | Mme R. DERRICHE | Chargée de cours (E.N.P.) |
| Rapporteur : | Mme F. BENTAHAR | Maître de Conférences (U.S.T.H.B.) |
| Invité : | M. Y.K. BENKAHLA | Docteur (U.S.T.H.B.) |

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

Département de Génie Chimique



T H E S E

présentée pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Par

BENSEBIA Bensaber

Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

**Contribution à l'étude de l'hydrodynamique
de l'Absorbeur à Contact Turbulent**

Proposée par : M. A. CIESLACK

Dirigée par : Mme F. BENTAHAR

Soutenue le 05 Juin 1995 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------|--------------------|------------------------------------|
| Président : | M. C.E. CHITOUR | Professeur (E.N.P.) |
| Examineurs : | Melle N. BENNANI | Chargée de cours (E.N.P.) |
| | Melle A. BENSMAILI | Maître de Conférences (U.S.T.H.B.) |
| | Mme R. DERRICHE | Chargée de cours (E.N.P.) |
| Rapporteur : | Mme F. BENTAHAR | Maître de Conférences (U.S.T.H.B.) |
| Invité : | M. Y.K. BENKAHLA | Docteur (U.S.T.H.B.) |

يهدف هذا العمل إلى الدراسة الهيدروديناميكية للتفاعل ذي الوسط السائل-غاز-سائل-صلب، في اتجاه معاكس للسائل و الغاز، والطور الغازي المستمر، موصل ذي طبقة مضطربة. نقدم دراسة مرجعية للأعمال التجريبية و التطبيقية المنشورة بالنسبة لهذه الطريقة. أجريت الدراسة التجريبية في عمود قطره 120 mm، أين يسير في اتجاه معاكس الهواء و الماء في المجال ($0 \leq 10 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ و $4.57 \leq 27.90 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$). خلال الدراسة التجريبية، نقدم تأثير المتغيرات التجريبية كالتدفق بالنسبة للسائل و الغاز، الارتفاع الساكن للغشوة و السطح الحر لشبكة الارتكاز على المعاملات الهيدروديناميكية: أي الإنخفاض في الضغط، تمدد الطبقة و السرعة الصغرى للتميع. نعطي سلوكاً كمياً لهذه التأثيرات على ضوء نتائجنا التجريبية. نقدم دراسة حول العلاقات المقترحة من طرف بعض الباحثين حول الإنخفاض في الضغط، تمدد السربير ثم نستنتج علاقات حول نتائجنا التجريبية.

Abstract

The aim of this work is the study of three-phase fluidized bed reactors with countercurrent flow of gas and liquid and with the gas as continuous phase (Turbulent Bed Contactor). We present a literature survey of experimental and theoretic works of the field. The experiments were carried out by contacting the gas (tap air) and liquid (water) countercurrently in a column of internal diameter 120 mm. Gas and liquid mass fluxes ranged from 0 to 10 Kg/m².s and 4.57 to 27.90 Kg/m². In experimental part we present the influence of operating variables (as gas and liquid fluxes, open area of the lower supporting grid, static bed height) on hydrodynamic parameters, as, pressure drop, bed expansion and minimum fluidization velocity. We indicate the qualitative trends based on our experimental results. Correlations for pressure drop and bed expansion are also presented.

Résumé

L'objet de ce travail est l'étude de l'hydrodynamique du réacteur à lit fluidisé gaz-liquide-solide à contre-courant de gaz et de liquide et à phase gazeuse continue (Contacteur à Lit Turbulent). On présente une étude bibliographique des travaux expérimentaux et théoriques publiés pour le procédé. L'étude expérimentale a été menée dans une colonne de 120 mm de diamètre où circulent à contre-courant l'air et l'eau dans les intervalles (0 à 10 Kg/m² et 4.57 à 27.90 Kg/m²). Dans la partie expérimentale, nous présentons l'influence des variables opératoires telles que: les flux gazeux et liquide, la hauteur statique de garnissage et l'aire libre de la grille support de garnissage; sur les paramètres hydrodynamiques qui sont les pertes de charge, la vitesse minimum de fluidisation et l'expansion du lit. On donne les tendances qualitatives de ces influence sur la base de nos résultats expérimentaux. Nous présentons une étude sur les corrélations proposées antérieurement et nous déduisons des corrélations pour les pertes de charge et l'expansion du lit, basées sur nos résultats.

يهدف هذا العمل إلى الدراسة الهيدروديناميكية للمفاعل ذي الوسط السائل-غاز-سائل-صلب، في اتجاه معاكس للسائل و الغاز، والطور الغازي المستمر (موصل ذي طبقة مضطربة). نقدم دراسة مرجعية للأعمال التجريبية و التطبيقية المنشورة بالنسبة لهذه الطريقة. أجريت الدراسة التجريبية في عمود قطره 120 mm، أين يسير في اتجاه معاكس الهواء و الماء في المجال ($0 \leq 10 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ و $4.57 \leq 27.90 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$). خلال الدراسة التجريبية، نقدم تأثير المتغيرات التجريبية كالتدفق بالنسبة للسائل و الغاز، الارتفاع الساكن للحشو و السطح الحر لشبكة الإرتكاز على المعاملات الهيدروديناميكية، أي الإنخفاض في الضغط، تمدد الطبقة و السرعة الصغرى للتميع. نعطي سلوكا كميًا لهذه التأثيرات على ضوء نتائجنا التجريبية. نقدم دراسة حول العلاقات المقترحة من طرف بعض الباحثين حول الإنخفاض في الضغط، تمدد السرير ثم نستنتج علاقات حول نتائجنا التجريبية.

Abstract

The aim of this work is the study of three-phase fluidized bed reactors with countercurrent flow of gas and liquid and with the gas as continuous phase (Turbulent Bed Contactor). We present a literature survey of experimental and theoretic works of the field.

The experiments were carried out by contacting the gas (tap air) and liquid (water) countercurrently in a column of internal diameter 120 mm. Gas and liquid mass fluxes ranged from 0 to 10 Kg/m².s and 4.57 to 27.90 Kg/m².

In experimental part we present the influence of operating variables (as gas and liquid fluxes, open area of the lower supporting grid, static bed height) on hydrodynamic parameters, as, pressure drop, bed expansion and minimum fluidization velocity.

We indicate the qualitative trends based on our experimental results. Correlations for pressure drop and bed expansion are also presented.

Résumé

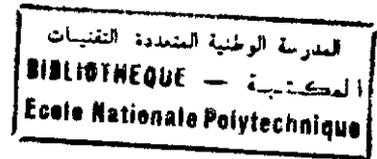
L'objet de ce travail est l'étude de l'hydrodynamique du réacteur à lit fluidisé gaz-liquide-solide à contre-courant de gaz et de liquide et à phase gazeuse continue (Contacteur à Lit Turbulent). On présente une étude bibliographique des travaux expérimentaux et théoriques publiés pour le procédé.

L'étude expérimentale a été menée dans une colonne de 120 mm de diamètre où circulent à contre-courant l'air et l'eau dans les intervalles (0 à 10 Kg/m² et 4.57 à 27.90 Kg/m²).

Dans la partie expérimentale, nous présentons l'influence des variables opératoires telles que; les flux gazeux et liquide, la hauteur statique de garnissage et l'aire libre de la grille support de garnissage; sur les paramètres hydrodynamiques qui sont les pertes de charge, la vitesse minimum de fluidisation et l'expansion du lit. On donne les tendances qualitatives de ces influence sur la base de nos résultats expérimentaux.

Nous présentons une étude sur les corrélations proposées antérieurement et nous déduisons des corrélations pour les pertes de charge et l'expansion du lit, basées sur nos résultats expérimentaux.

AVANT-PROPOS



Cette étude a été effectuée au Département de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Le thème de ce travail a été proposé par M. A. CIESLACK, qui après son départ en Pologne m'a gracieusement envoyé les deux types de garnissage prévus pour cette étude. Je le remercie vivement pour ces précieux conseils et pour sa contribution à la réalisation de cette étude.

Je voudrais remercier, également, Madame W. YAICI pour sa contribution dans la direction de ce travail et pour l'abondante documentation qu'elle a mis à ma disposition.

Ce travail a été dirigé par Madame BENTAHAR Fatiha Maître de Conférences à l'université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène d'Alger.

Je tiens particulièrement à témoigner à Madame BENTAHAR ma profonde gratitude pour ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité. Je la remercie pour l'aide constante qu'elle m'a prodiguée tout au long de ce travail. J'ai beaucoup appris de sa rigueur scientifique, et de ses connaissances.

Je remercie vivement Monsieur Le Professeur C.E. CHITOUR, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Je tiens, également, à remercier Mesdemoiselles A. BENSMAILI et N. BENNANI, Madame A.DERRICHE et Monsieur Y.K. BENKAHLA pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie tous ceux qui m'ont apporté leur aide, morale ou autre, pour mener à terme ce travail. Je pense particulièrement à Hadj, Khaled, Mohamed et Malik..

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A Ouahida....

TABLE DE MATIERE

Etude de l'hydrodynamique du Contacteur à lit turbulent

| | |
|---|----|
| Introduction | 1 |
| Chapitre I: Modes de fluidisation | |
| I.1. Classification des systèmes Gaz-Liquide-Solide | 4 |
| I.2. Modes de fluidisation des systèmes triphasés | 5 |
| I.2.1. Systèmes à co-courant | 6 |
| I.2.1. Systèmes à contre-courant | 7 |
| I.2.1.1. Systèmes à contre-courant avec le liquide comme phase continue | 8 |
| I.2.1.2. Systèmes à contre-courant avec le gaz comme phase continue | 8 |
| I.2.3. Système avec liquide stagnant | 8 |
| I.3. Modes opératoires du Contacteur à Lit Turbulent | 8 |
| I.3.1. Modes de fonctionnement d'une colonne à garnissage | 9 |
| I.3.1.1. Fluidisation sans commencement d'engorgement. Type "I.ACT" | 12 |
| I.3.1.2. Fluidisation avec commencement d'engorgement. Type "II.ACT" | 13 |
| I.3.2. Prédiction du mode de fluidisation | 13 |
| Chapitre II: Etude de l'hydrodynamique et du transfert de matière dans l'absorbeur à contact turbulent | |
| II.1. Etude de l'hydrodynamique | 15 |
| II.1.1. Perte de charge | 15 |
| II.1.1.1. Généralités. Différents modèles | 15 |
| II.1.1.2. Revue bibliographique | 17 |
| II.1.2. Rétention liquide | 18 |
| II.1.2.1. Généralités | 18 |
| II.1.2.2. Revue bibliographique | 21 |
| II.1.3. Rétention de gaz | 22 |
| II.1.3.1. Généralités | 22 |
| II.1.3.2. Revue bibliographique | 23 |
| II.1.4. Vitesse minimum de fluidisation | 30 |
| II.1.4.1. Modèles proposés | 30 |
| II.1.4.2. Revue bibliographique | 31 |
| II.1.5. Expansion du lit | 36 |
| II.1.5.1. Généralités. Différents modèles | 36 |
| II.1.5.2. Revue bibliographique | 37 |

| | |
|---|----|
| II.2. Etude du transfert de matière | 41 |
| II.2.1. Coefficient global de transfert de matière | 41 |
| II.2.2. Coefficient local de transfert de matière, coté gaz | 45 |
| II.2.3. Coefficient local de transfert de matière, coté liquide | 47 |
| II.2.4. Aire interfaciale | 48 |

Chapitre III: Installation expérimentale. Caractéristiques et procédure expérimentale. Méthodes de mesure.

| | |
|--|----|
| III.1. Caractéristiques du dispositif expérimental | 53 |
| III.1.1. Colonne d'étude | 55 |
| III.1.2. Distributeur de liquide | 57 |
| III.1.3. Distributeur de gaz | 57 |
| III.1.4. Grille support de garnissage | 60 |
| III.2. Procédure expérimentale | 61 |
| III. 1. Conditions opératoires | 61 |
| III. 2. Procédure Expérimentale | 61 |
| III.3. Méthodes de mesure et calculs | 62 |
| III. 3. 1. Débit de gaz | 62 |
| III. 3. 2. Débit de liquide | 62 |
| III. 3. 3. Perte de charge | 62 |
| III. 3. 4. Vitesse minimum de fluidisation | 63 |
| III. 3. 5. Expansion du lit | 64 |
| III.4. Propriétés des fluides | 64 |
| III.4.1. Propriétés du gaz | 64 |
| III.4.2. Propriétés du liquide | 65 |
| III.5. Propriétés du solide | 65 |

Chapitre IV: Résultats expérimentaux et analyse

| | |
|--|----|
| IV.1. Pertes de charge | 67 |
| IV.1.1. Effet du flux de gaz | 67 |
| IV.1.2. Effet du flux liquide | 73 |
| IV.1.3. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 73 |
| IV.1.4. Effet de la hauteur statique du garnissage | 80 |
| IV.1.5. Comparaison des résultats expérimentaux | 80 |
| IV.1.6. Estimation de l'expansion du lit | 83 |

| | |
|---|------------|
| IV.2. Etude de l'expansion du lit | 89 |
| IV.2.1. Effet du flux de gaz | 89 |
| IV.2.2. Effet du flux liquide | 94 |
| IV.2.3. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 94 |
| IV.2.4. Effet de la hauteur statique du garnissage | 101 |
| IV.2.5. Comparaison des résultats expérimentaux | 101 |
| IV.2.6. Estimation de l'expansion du lit | 106 |
| IV.3. Vitesse minimum de fluidisation | 109 |
| IV.3.1. Effet du flux liquide | 109 |
| IV.3.2. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 109 |
| IV.3.3. Effet des dimensions du garnissage | 114 |
| IV.3.4. Estimation de la vitesse minimum de fluidisation | 114 |
| IV.4. Corrélations des paramètres hydrodynamiques | 118 |
| IV.4.1. Corrélations des pertes de charge | 118 |
| IV.4.2. Corrélation de l'expansion du lit | 119 |
| Conclusion générale | 129 |
| Références bibliographiques | 131 |
| Nomenclature | 138 |
| Index des figures | 140 |
| Index des tableaux | 144 |
| Annexes | |
| A.1. Etalonnage du débitmètre de liquide | |
| A.2. Etalonnage du débitmètre de gaz | |
| A.3. Porosité du lit | |
| A.4. Résultats expérimentaux | |
| A.5. Valeurs expérimentales de la vitesse minimum de fluidisation | |
| A.6. Résultats du calcul des pentes des équations représentant les zones de variation de l'expansion du lit | |
| A.7. Calcul des corrélations de pertes de charge et de l'expansion du lit | |
| A.8. Représentation des pertes de charge et de l'expansion du lit pour chaque série de mesures. | |

INTRODUCTION GENERALE

Le procédé de fluidisation gaz - liquide - solide, objet de la présente étude est connu actuellement sous le nom "Absorbeur à Contact Turbulent" (A.C.T.).

Le lit de particules de densité assez faible, est fluidisé par un courant ascendant de gaz constituant la phase continue et irriguée par un courant liquide descendant. Les particules utilisées sont en général des sphères de diamètre compris entre 10 et 38 mm et de masse volumique comprise entre 182 et 980 kg/m³.

La première communication sur ce procédé est due à Kielback en 1959 [28] qui désigna le procédé sous le nom de "Epurateur à Lit Flottant".

Les premières études systématiques sur le procédé sont dues à H.R.Douglas en 1963 [13] qui étudia sur une unité pilote, l'absorption de CO₂ et SO₂ dans des solutions alcalines.

Plusieurs autres études furent publiées et avaient pour la plupart, comme objectif, l'étude des paramètres et du comportement hydrodynamiques du procédé.

Ces études, pour la plupart d'entre-elles, proposèrent des corrélations empiriques pour prédire les différents paramètres hydrodynamiques de l'absorbeur à contact turbulent.

Peu de théorie a été par contre développé, et les résultats furent souvent inconstants et parfois même contradictoires.

En 1972 B.K.O'Neil [50] proposa un modèle théorique pour ce procédé en se basant sur le comportement hydrodynamique d'une colonne à garnissage conventionnelle.

Les travaux ultérieurs à cette étude, font presque tous référence à ce modèle, qui expliqua par ailleurs, nombre de certaines contradictions des résultats antérieurs et qui représente une contribution importante pour la compréhension du comportement hydrodynamique du procédé.

Les absorbeurs à lit turbulent furent utilisés pendant ces vingt dernières années pour l'absorption et l'épuration des gaz. Vers le milieu des années 1970, et suite à la crise énergétique, ce procédé fut utilisé pour l'élimination de SO₂ des gaz de combustion du charbon.

Les absorbeurs à contact turbulent offrent des avantages considérables par rapport aux colonnes à garnissage conventionnelles. En effet, ils opèrent à de grands débits de gaz et de liquide, favorisant le transfert de masse et de chaleur, et la mobilité des particules de garnissage empêche le colmatage de la grille.

Cependant, les applications industrielles du procédé ont mis en évidence certains inconvénients du procédé tels que les pulsations du lit, rétro-mélange dans la phase liquide et l'érosion mécanique des sphères constituant le garnissage; mais les hautes performances de ce procédé lui ont permis de connaître une utilisation continue et de plus en plus répandue dans l'industrie.

L'objectif de notre étude est :

- la conception et la réalisation de l'installation expérimentale,
- l'étude hydrodynamique en utilisant les méthodes de mesure les plus simples.

Dans le chapitre I, nous passons en revue les différents modes de fluidisation gaz-liquide-solide ainsi que les modes de fonctionnement de l'absorbeur à contact turbulent.

Le chapitre II est consacré à l'étude des différents paramètres de l'hydrodynamique et du transfert de matière pour le procédé "Absorbeur à Contact Turbulent". Une étude théorique et revue bibliographique des résultats expérimentaux seront présentées pour chaque paramètre.

Le chapitre III est consacré à la mise au point de l'installation expérimentale qui a permis de réaliser les mesures hydrodynamiques sur une gamme représentative de variation des divers paramètres. Les méthodes de mesures sont également décrites dans ce chapitre.

Dans le chapitre IV, l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sont présentés et interprétés.

CHAPITRE I : MODES DE FLUIDISATION DES SYSTEMES TRIPHASIQUES

I.1. Classification des systèmes Gaz-Liquide-Solide

I.2. Modes de fluidisation des systèmes triphasés

I.2.1. Systèmes à co-courant

I.2.2. Systèmes à contre-courant

I.2.1.1. Systèmes à contre-courant avec le liquide comme phase continue

I.2.1.2. Systèmes à contre-courant avec le gaz comme phase continue

I.2.3. Système avec liquide stagnant

I.3. Modes opératoires du Contacteur à Lit Turbulent

I.3.1. Modes de fonctionnement d'une colonne à garnissage

I.3.1.1. Fluidisation sans commencement d'engorgement. Type "I.LACT"

I.3.1.1. Fluidisation avec commencement d'engorgement. Type "II.LACT"

I.3.2. Prédiction du mode de fluidisation

CHAPITRE I

MODES DE FLUIDISATION

La fluidisation gaz-liquide-solide est définie comme étant une opération où un lit de particules solides est maintenu suspendu dans un milieu gaz/liquide grâce à l'action des forces de frottement du gaz et/ou du liquide agissant contre la force de gravitation sur les particules.

Cette opération génère un contact considérable et intime entre le gaz, le liquide et les particules solides, et présente des avantages substantiels pour des applications dans des procédés physiques, chimiques ou biochimiques faisant intervenir des phases gazeuses, liquides et solides.

Deux modes sont possibles pour la mise en œuvre pratique de la fluidisation gaz-liquide-solide (G-L-S).

Dans ce chapitre seront passés en revue les différents modes de fluidisation gaz-liquide-solide. Une deuxième partie est consacrée à l'étude particulière des modèles d'écoulement hydrodynamiques dans le contacteur à lit turbulent.

I.1. Classification

Les systèmes triphasiques sont classifiés suivant certaines différences dans leur comportement hydrodynamique. Cependant, il est pratique de les classer suivant la nature du mouvement des particules solides de manière similaire à celle des systèmes gaz-solide ou liquide - solide.

La nature du mouvement des particules peut être divisé en trois régimes de base:

- régime de lit fixe,
- régime de lit dilaté,
- régime de transport.

Le lit fixe existe quand la force d'entraînement exercée sur les particules et par le courant de gaz et/ou de liquide est plus petite que le poids apparent du solide dans le système.

Quand, avec l'augmentation de la vitesse du gaz et/ou du liquide, la force d'entraînement égalise le poids apparent du solide, le lit se trouve dans l'état de minimum de fluidisation et marque le commencement de lit dilaté.

Avec une augmentation supplémentaire de la vitesse du gaz et/ou du liquide au delà de la vitesse de fluidisation, l'opération est dans le domaine de lit dilaté, jusqu'à ce que la vitesse terminale de chute libre des particules dans le milieu gaz-liquide. La vitesse minimale de transport est égale à la vitesse terminale de chute libre d'une particule unique soumise à l'action de la pesanteur.

Tableau 1: Classification des systèmes triphasiques suivant le mouvement des particules solides

| Facteur | Variation |
|--|--|
| Nature du mouvement des particules solides | <ul style="list-style-type: none"> *Stationnaire *Suspension avec agitation mécanique *suspension sans agitation mécanique *Fluidisation |
| Type de l'opération | <ul style="list-style-type: none"> *Gaz: continu *Liquide: stagnant ou continu *Solide: stagnant ou continu |
| Direction relative des courants | <ul style="list-style-type: none"> *Gaz, liquide: cocourant vers le haut ou vers le bas contre-courant ou courant croisé *Solide: courant vers le haut ou vers le bas |
| Etat des phases | <ul style="list-style-type: none"> *Gaz: phase continu ou bulles discrètes *Liquide: phase continue, film, gouttelettes *Solide: garnissage, suspension, fluidisation, fluidisation avec la phase continue. |

En 1981, Epstein [17] propose une classification des modes de fluidisation sous forme de taxonomie (figure1).

I.2. Modes opératoires des systèmes triphasés

La fluidisation Gaz-Liquide-Solide englobe les régimes de lit dilaté et de transport avec la vitesse terminale de la particule (U_t) variant de 0,03 à 50 cm/s. Nous nous limiterons au régime de lit dilaté.

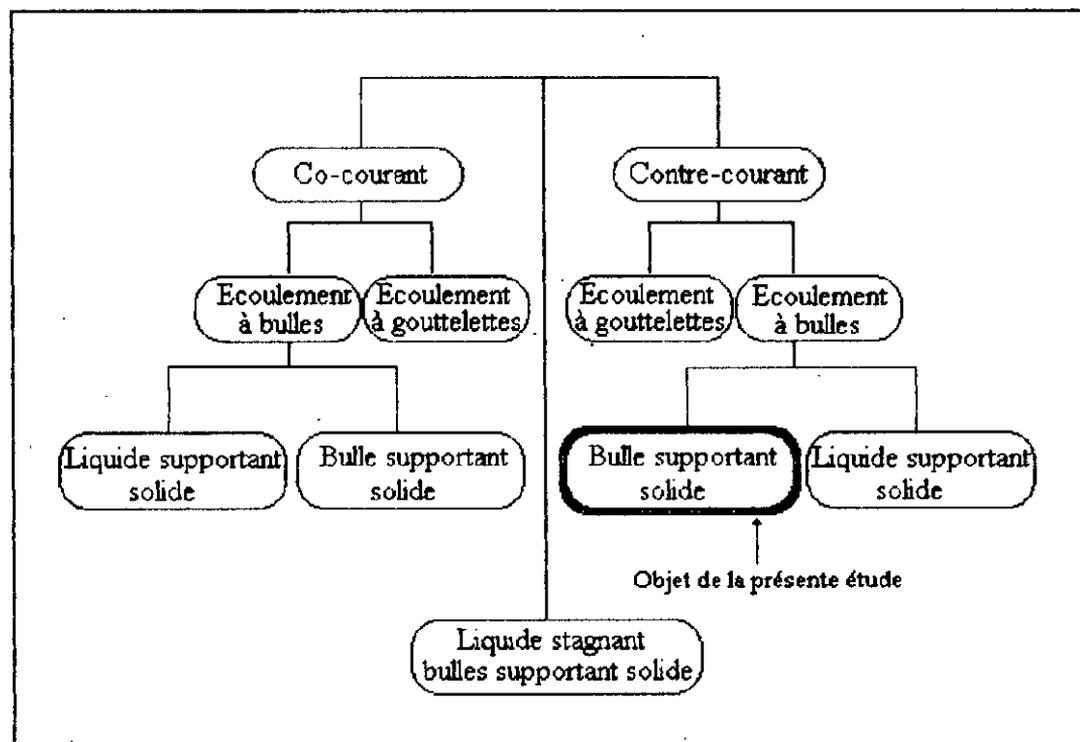


Figure 1: Classification des modes de fluidisation d'après la nature relative des courants (Epstein [17])

Nous décrivons les différents systèmes à co-courant et à contre courant. Ces différents systèmes sont représentées sur la figure (2).

1.2.1. Systèmes à co-courant

Dans le régime de lit dilaté avec la phase liquide continue ascendante vers le haut en co-courant avec le gaz, le solide peut être introduit en continu en discontinu. Pour des particules assez larges, ou assez denses ($Ut > 5 \text{ cm/s}$), le solide peut être chargé ou déchargé indépendamment du courant liquide (mode I-a-1), dans un tel système, les particules sont uniformément distribuées.

Pour des particules plus petites ou plus légères ($Ut < 5 \text{ cm/s}$), l'alimentation et le déchargement des particules solides dépend du courant liquide (mode E-I-a-2), dans un tel système, la concentration des particules décroît axialement en remontant vers le haut, et la surface du lit est mal définie.

Pour les deux modes (I-a-1 et I-a-1), l'expansion du lit peut être supportée par la phase liquide, les bulles de gaz ou les deux à la fois.

| | | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------|----------|---------|
| Co-courant vers le haut | Mode | E.I.a-1 | E.I.a-2 | E.I.b |
| | Diagramme schématique | | | |
| | Phase continue | Liquide | Liquide | Gaz |
| Contre-courant | Mode | E.II.a-1 | E.II.a-2 | E.II.b |
| | Diagramme schématique | | | |
| | Phase continue | Liquide | Liquide | Gaz |
| Liquide stagnant | Mode | E.III.a | | E.III.b |
| | Diagramme schématique | | | |
| | Phase continue | Liquide | | Gaz |

Figure 2: Classification de base des systèmes triphasiques (Fan [18]).

I.2.2 Systèmes à contre-courant

Pour les systèmes à contre-courant, la phase continue peut être soit la phase liquide, soit la phase gazeuse.

I.2.2.1 Systèmes à contre-courant avec le liquide comme phase continue

Dans le lit dilaté avec la phase liquide s'écoulant vers le bas à contre courant de gaz, la direction de l'expansion du lit dépend de la différence entre les masses volumiques du solide et de la phase continue.

Quand la masse volumique du liquide excède celle du solide, le lit de particules se dilate vers le bas (mode E.II.a-1). Ce mode est appelé Lit Fluidisé Inverse .

Quand la masse volumique du solide est supérieure à celle du liquide, le lit de particules se dilate vers le haut supporté par les bulles de gaz (mode E.II.a-2).

I.2.2.2 Systèmes à contre-courant avec le gaz comme phase continue

Quand la phase continue est le gaz, la densité du liquide est généralement, notablement supérieure à celle du solide et le liquide s'écoule goutte à goutte vers le bas à travers le lit exposé supporté par le courant de gaz (mode E.II.b). Ce mode est appelé Absorbéur à Contact Turbulent.

I.2.3. Systèmes avec liquide stagnant.

Pour le lit dilaté avec la phase liquide stagnant, le solide est chargé et déchargé en discontinu.

Quand la masse volumique des particules solides est supérieure à celle du liquide, le liquide étant la phase continue, le lit dilaté est supporté par les bulles de gaz (mode E. III.a).

La figure (3) représente le diagramme des régimes en fluidisation triphasée à contre courant de gaz et de liquide.

I. 3. Modes de fluidisation pour l'absorbéur à contact turbulent

O'Neil et col en 1972 [50] proposèrent un modèle d'écoulement reliant le comportement hydrodynamique du contacteur à lit turbulent à celui d'une colonne à garnissage conventionnelle à lit fixe.

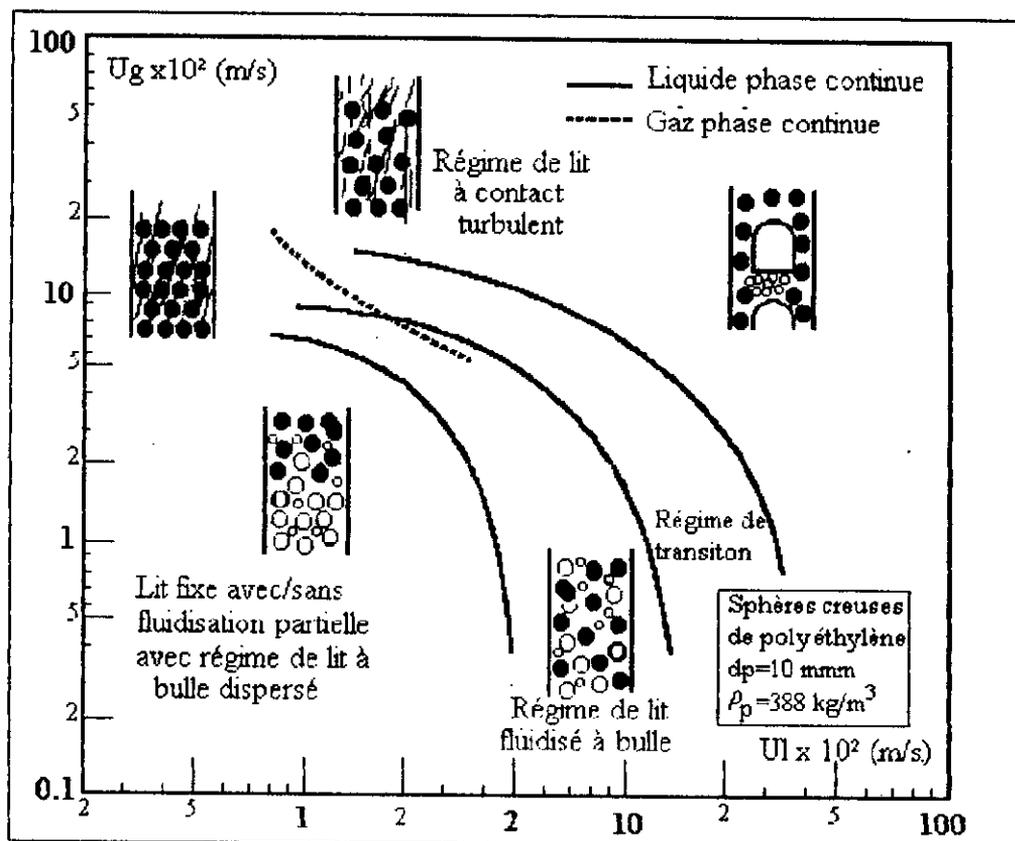


Figure 3: Diagramme d'écoulement des courants des systèmes triphasiques (Muroyama et Col. [49])

Selon ce modèle, le contacteur pour gaz et liquide à lit mobile pourrait exister sous deux formes, à savoir une fluidisation exempte d'engorgement, et une fluidisation due à un commencement d'engorgement.

Le modèle de fonctionnement établi dépend surtout de la densité du garnissage solide, dépend aussi à un degré moindre, des dimensions du garnissage, de l'écoulement liquide, et des propriétés du liquide.

Le modèle de O'Neil et col [50], représente une importante contribution pour la compréhension du comportement hydrodynamique des contacteurs à lit mobile.

I.3.1 Modes de fonctionnement d'une colonne à garnissage.

Les différents modes de fonctionnement d'une colonne à garnissage peuvent être discutés à l'aide des courbes de perte de charge-engorgement ABCD (figure 4) pour un garnissage donné et un débit liquide particulier. Le poids du garnissage et du liquide retenu

dépendra de la densité du garnissage ρ_p . Les courbes représentant ce poids pour différentes densités (figure 5) ont la même allure et sont approximativement horizontales jusqu'au point de charge du fait que la rétention liquide n'augmente pas de façon significative jusqu'à ce point. Au delà de cette limite, les courbes s'élèvent parce que la rétention liquide augmente avec l'augmentation du débit gazeux. Aux points d'intersection tels que (X_2 , X_3) la perte de charge devient suffisante pour soulever le garnissage. Les modes de fonctionnement suivants sont possibles:

(1) Colonne conventionnelle:

Dans une colonne conventionnelle, avec un garnissage lourd (densité ρ_{p4} sur la figure 5) aucune intersection n'est possible, si le débit du gaz augmente, pour un débit liquide fixe, l'engorgement du système a lieu, ce qui limite les débits des courants liquides et gazeux.

(2) ACT Type.1. Fluidisation sans commencement d'engorgement:

Pour un garnissage de très faible densité comme ρ_{p1} , quand le débit de gaz augmente, à débit liquide constant, la perte de charge qui contrebalance le poids du garnissage et la rétention liquide, est atteinte avant la vitesse d'engorgement. Le garnissage se dilate et cette situation est montrée par le point X_1 .

(3) ACT Type 2. Fluidisation due à un commencement d'engorgement:

Pour ce mode de fonctionnement, la densité est donnée par ρ_{p2} . Quand le débit du gaz croit au delà du point d'engorgement l'activité interfaciale augmente jusqu'au point X_2 où la perte de charge égalise le poids du lit. Le lit se dilate, jusqu'à ce qu'une nouvelle situation d'engorgement apparaisse.

Dans ce mode, l'activité interfaciale qui engorgerait le lit fixe, est le meilleur moyen par lequel, la perte de charge puisse s'établir à un niveau suffisant pour fluidiser le lit. De grands débits deviendraient possibles (des débits plus importants que ceux qui engorgeraient le lit fixe dans une colonne conventionnelle) et une turbulence intense serait prévue.

(4) Courant à bulles (bubble flow):

Dans la colonne à garnissage il est possible d'opérer dans une colonne à garnissage à l'état d'engorgement par barbotage de gaz à travers le lit de liquide, suivant la densité du garnissage et ses dimensions, il peut être à l'état fixe ou en suspension, le procédé est dans ce cas appelé "Fluidisation triphasée".

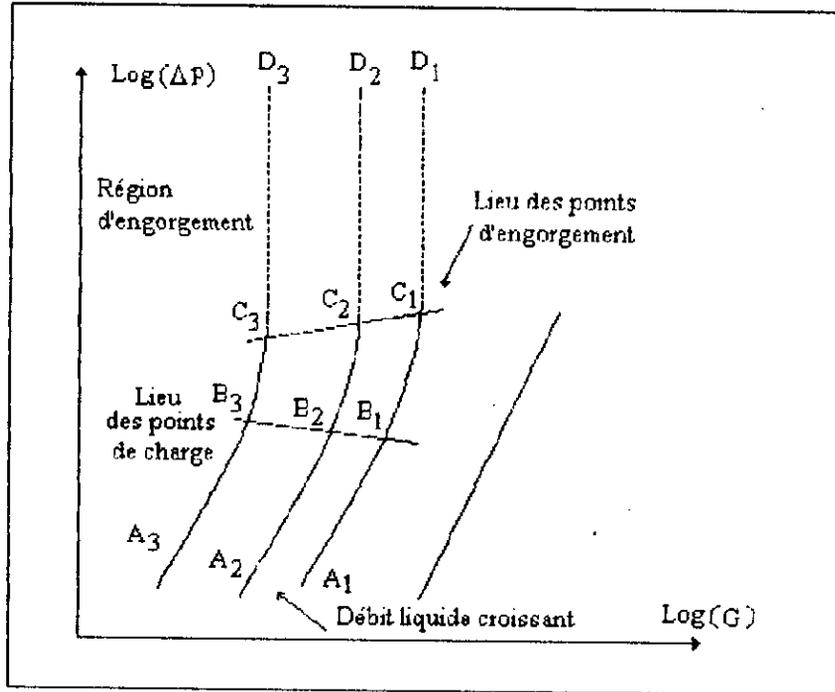


Figure 4: Représentation typique des pertes de charges dans une colonne à garnissage

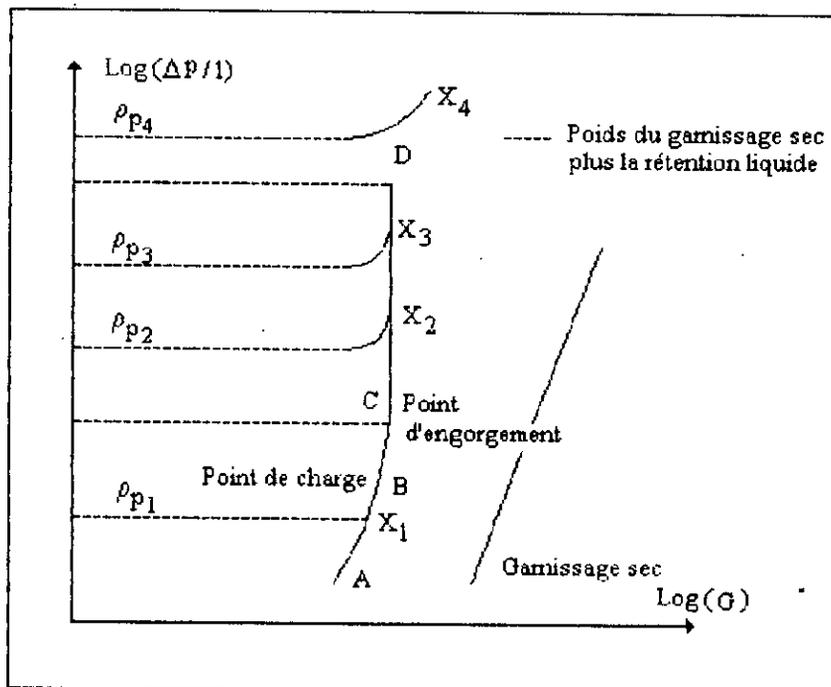


Figure 5: Gradient de pression représentant les modes de fluidisation de l'absorbeur à contact turbulent

I.3.1.1 "ACT Type I" Fluidisation sans commencement d'engorgement:

Pour ce mode de fonctionnement la perte de charge à travers le lit, est égale au poids du garnissage et à la rétention liquide à des débits au dessous de ceux qui conservent l'engorgement pour la même géométrie. La vitesse minimum de fluidisation devrait augmenter avec la densité du garnissage. A débit liquide constant, une augmentation du débit du gaz au delà du minimum de fluidisation se manifesterait par l'expansion du lit. Il est à noter que la géométrie du lit à garnissage mobile change quand le lit se dilate. Si le point d'intersection a lieu au dessous du point de charge B, on prévoit que la rétention liquide demeure approximativement constante, quand le débit de gaz croit pour un arrosage liquide fixe comme cela a été montré par Chen et Douglas [10], et Groeneveld [26]. Une légère dépendance pourrait être envisagée si l'intersection a lieu au dessus du point d'engorgement.

I.3.1.2 "ACT Type II" Fluidisation avec commencement d'engorgement:

Pour ce mode de fonctionnement le film liquide est en état d'engorgement. Le début d'engorgement implique qu'une augmentation du débit gazeux ou liquide, pour les mêmes pièces de garnissage et la même géométrie, causerait l'engorgement. Si l'on augmentait le débit gazeux légèrement, le lit se dilaterait jusqu'à ce qu'une nouvelle situation d'engorgement apparaisse.

A l'engorgement naissant, il y a une grande activité interfaciale due à la quantité de mouvement transférée entre le gaz et le liquide. L'intensité de l'activité interfaciale peut encore augmenter, et par suite le coefficient de transfert de masse, avec l'augmentation de la densité du garnissage (le point d'intersection se déplacerait de X_2 à X_3). Cependant, il existe une densité maximum au dessus de laquelle, l'opération de fluidisation n'est plus possible.

Pour ce mode de fonctionnement, pour un système donné, et un débit liquide donné, l'activité interfaciale augmente avec le débit du gaz. Ainsi, la rétention liquide est appelée à augmenter avec une augmentation du débit du gaz. De même on prévoit que la rétention liquide augmenterait avec l'augmentation de la taille des particules et densité du garnissage. En effet, une grande activité interfaciale est nécessaire pour supporter un garnissage plus lourd.

La vitesse minimum de fluidisation devrait être indépendante de la densité du garnissage.

I.3.3 Prédiction du mode de fluidisation

D'après la figure (5) il apparait clairement que la fluidisation sans engorgement naissant est confinée aux lits avec un garnissage de très faible densité.

Analogiquement, il existe une limite supérieure pour la densité du garnissage pouvant opérer en régime à engorgement naissant.

En conclusion, deux modes d'opération sont possibles pour le contacteur à lit turbulent. La plupart des confusions sur les observations faites sur ce type de fluidisation peuvent être résolus en adoptant ce modèle et en identifiant le mode d'opération.

Le mode d'opération dépend essentiellement de la densité du garnissage et dans une moindre mesure de la dimension du garnissage, du débit liquide et des propriétés physiques du liquide (Figure 6).

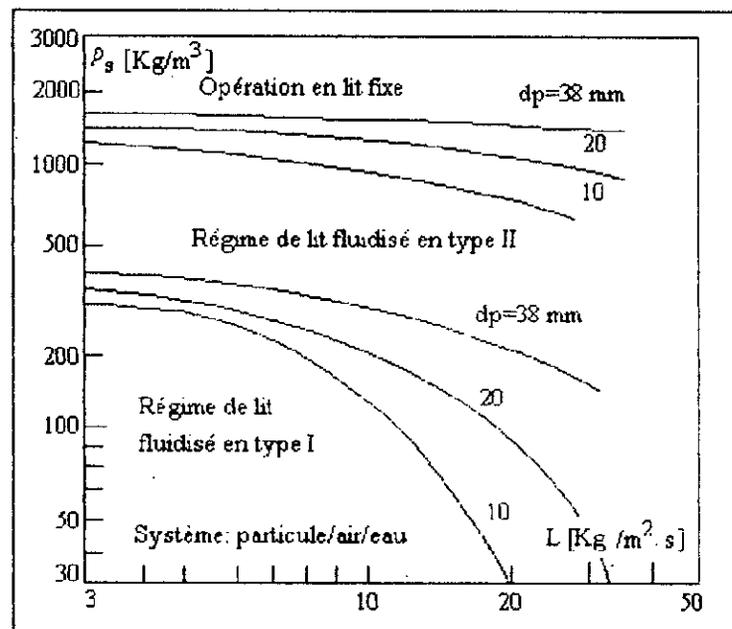


Figure 6: Régimes opératoires pour les types I et II "A.C.T." (Vujanek-Novakovic, [67])

L'opération dans le régime de commencement d'engorgement est particulièrement recommandée pour le flux à contre courant à de hautes activités interfaciales générant de grandes vitesses de transfert de masse.

CHAPITRE II : ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET DU TRANSFERT DE MATIERE DANS L'ABSORBEUR A CONTACT TURBULENT

II.1. Etude de l'hydrodynamique

II.1.1. Pertes de charge

II.1.1.1. Généralités. Différents modèles.

II.1.1.2. Revue bibliographique

II.1.2. Rétention liquide

II.1.2.1. Généralités

II.1.2.2. Revue bibliographique

II.1.3. Rétention de gaz

II.1.3.1. Généralités

II.1.3.2. Revue bibliographique

II.1.4. Vitesse minimum de fluidisation

II.1.4.1. Modèles proposés

II.1.4.2. Revue bibliographique

II.1.5. Expansion du lit

II.1.5.1. Généralités. Différents modèles

II.1.5.2. Revue bibliographique

II.2. Etude du transfert de matière

II.2.1. Coefficient global de transfert de matière

II.2.2. Coefficient local de transfert de matière, coté gaz

II.2.3. Coefficient local de transfert de matière, coté liquide

II.2.4. Aire interfaciale

CHAPITRE II

ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET DU TRANSFERT DE MATIERE DANS L'ABSORBEUR A CONTACT TURBULENT

II.1. Etude de l'hydrodynamique du contacteur à lit turbulent.

Les principaux paramètres caractérisant l'hydrodynamique du contacteur à lit turbulent sont:

- les pertes de charge qui déterminent la consommation de l'énergie requise pour le procédé;
- les rétentions de liquide et de gaz qui influencent les pertes de charge;
- la vitesse minimum de fluidisation et la vitesse d'engorgement du lit mobile qui déterminent les conditions opératoires extrêmes;
- l'expansion du lit qui détermine la hauteur du lit et donc celle de la colonne;
- le degré de mélange des phases qui permet de déterminer les modèles d'écoulement de chaque phase.

Dans ce paragraphe, une revue bibliographique et une étude théorique de chaque paramètre de l'hydrodynamique du procédé seront présentées. Pour chaque paramètre, nous présenterons les différentes corrélations proposées par les auteurs et les conditions opératoires dans lesquelles elles ont été déduites.

II.1.1 Pertes de charge.

Les pertes de charge à travers le lit sont le paramètre le plus important pour le fonctionnement de l'Absorbeur à Contact Turbulent (A.C.T). Elles déterminent la consommation d'énergie requise lors de l'exploitation et représentent le paramètre le plus important permettant de caractériser le comportement hydrodynamique du lit fluidisé.

II.1.1.1 Généralités. Différents modèles.

Deux approches de base ont été utilisées pour calculer et prédire les pertes de charge à travers le lit:

- la première est basée sur la tentative de modifier la théorie des systèmes diphasiques et de l'appliquer aux systèmes triphasiques. Elle fut développée en premier lieu par Tichy, [59]. Cette méthode se révéla infructueuse;

-la deuxième approche est basée sur l'hypothèse que les pertes de charge sont la somme des contributions dues au poids du garnissage sec, de la rétention liquide et de la rétention de gaz:

$$-\Delta P = [(1 - \varepsilon_0)\rho_p + \varepsilon_1 \rho_l].g.H_{st} \quad (\text{II.1})$$

où:

$-\Delta P$ représente les pertes de charge à travers le lit.

Les pertes de charge dans la phase gazeuse à travers la colonne ($-\Delta P_c$) sont la somme des contributions dues, en plus des pertes de charge à travers le lit, à celles dues à la grille support, à l'éliminateur de brouillard, à la section de pulvérisation au dessus et dessous du lit, aux parois de la colonne, et à la tension superficielle gaz-liquide.

L'expression suivante fut proposée par Wozniak [72] :

$$-\Delta P_c = (\rho_p \cdot \varepsilon_p + \rho_l \cdot \varepsilon_l + \rho_g \cdot \varepsilon_g) \cdot g \cdot H_d + \sum(-\Delta P_f) \quad (\text{II.2})$$

où:

$\sum(-\Delta P_f)$ est la somme de toutes les pertes de charge à l'exclusion de celles dues aux termes hydrodynamiques de chaque phase.

En général, $\sum(-\Delta P_f)$ peut être représentée par:

$$\sum(-\Delta P_f) = (-\Delta P_g) + (-\Delta P_\sigma) + (-\Delta P_w) \quad (\text{II.3})$$

où:

ΔP_g , ΔP_w , ΔP_σ représentent respectivement les pertes de charge dues à l'écoulement à travers la grille support de garnissage, celles dues aux frottements contre les parois de la colonne et les pertes de charge dues à la tension superficielle entre le gaz et le liquide.

De nombreux auteurs observèrent que $(-\Delta P_g)$ était fortement affectée par la géométrie de la grille support, et des corrélations furent proposées pour en prédire les variations, parmi elles, celles de Blyakher [8], Levsh [44], Mayak et Matrozov [47].

Tichy [59], trouva que $(-\Delta P_g)$ pouvait être négligée pour une grille ayant une grande surface libre (82% de vide) et Kito [34], suggéra de négliger $(-\Delta P_g)$ lorsqu'il n'y a pas de couche stagnante de liquide au dessus de la grille support.

La valeur de $(-\Delta P_w)$ est affectée par le diamètre de la colonne. Wozniak [72] et Uysal [64] notèrent que pour des colonnes de large diamètre, $(-\Delta P_w)$ pouvait être négligée.

La valeur de $(-\Delta P_\sigma)$ dépend de la nature du liquide et du gaz mis en œuvre.

II.1.1.2.Revue bibliographique.

L'étude des différentes données expérimentales sur les pertes de charge à travers le lit, fait apparaître que les courbes représentant la variation des pertes charge en fonction de la vitesse superficielle du gaz montrent clairement l'existence de quatre domaines bien distincts (Balabekov [2], [3], Uchida [63], Tichy et Douglas [59]).

Ces quatre domaines sont:

- I. Lit fixe
- II. Domaine de fluidisation partielle
- III. Domaine de fluidisation développée
- IV. Domaine d'engorgement.

La figure 7 représente ces domaines dans le cas des résultats de Kito et col. [34].

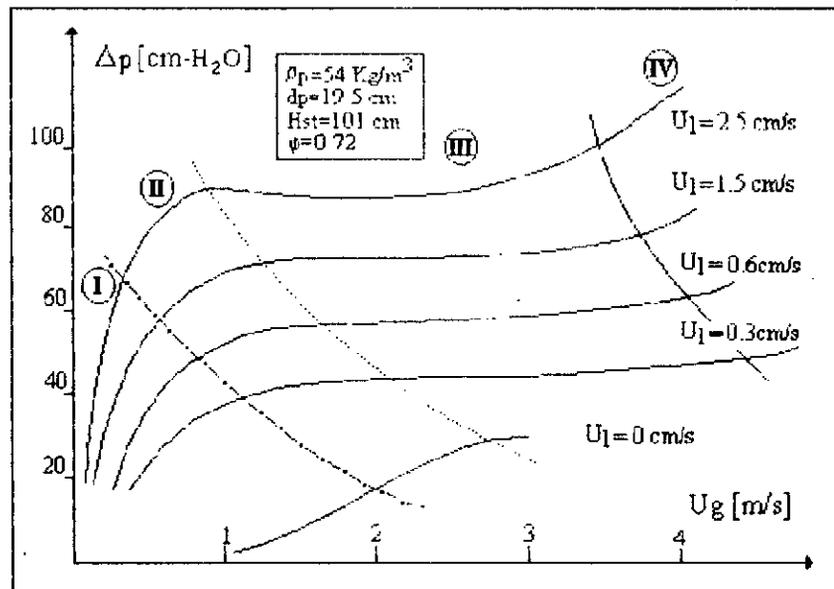


Figure7: Domaines de variations des pertes de charge (Résultats de Kito et col [34])

La variation des pertes de charge à travers le lit mobile en fonction du débit de gaz fait apparaître à partir du minimum de fluidisation, deux domaines bien distincts:

- le premier où (ΔP) augmente lors de la mise en fluidisation progressive des couches de garnissage:

-le deuxième où (ΔP) demeure constante avec le débit gazeux, lors de la fluidisation totale.

Toutes les données publiées font également ressortir que les pertes de charge augmentent avec le débit de l'arrosage liquide.

D'après Balabekov [3], [4], Krainev [39], les pertes de charge augmentent avec la hauteur statique du garnissage et la masse volumique du garnissage.

A travers la colonne, les pertes de charge sont également très affectées par la géométrie de la grille support de garnissage et notamment la surface libre de la grille.

Les différentes conditions opératoires et corrélations proposées par les différents auteurs sont regroupées dans le tableau 2.

II.1.2. Rétention liquide

La rétention liquide à travers le lit du contacteur à lit turbulent est le paramètre le plus important pour calculer la perte de charge

II.1.2.1. Généralités.

La rétention liquide, ou gazeuse, est la fraction de liquide ou de gaz retenue dans le lit à l'état dilaté.

V_d , étant le volume total du lit dilaté, on peut écrire:

$$V_d = V_p + V_g + V_l \quad (\text{II.4})$$

où:

V_p , V_g et V_l sont, respectivement, les volumes occupés par le garnissage, le gaz et le liquide.

En termes de fraction volumique pour chaque phase, l'équation (II.4) devient:

$$\varepsilon_p + \varepsilon_g + \varepsilon_l = 1 \quad (\text{II.5})$$

Tableau 2: Corrélations pour le calcul des pertes de charge (ΔP)

| AUTEURS | CONDITIONS OPERATOIRES | | | | | | | | CORRELATIONS EN UNITES S.I. | Type de régime |
|-------------------------|------------------------|------------------------------|--------------|----------------------------------|----------------|---------------|------------------|---------------|--|-----------------|
| | U_g [m/s] | L [Kg/m ² s] | Hst [mm] | ρ_p [kg/m ³] | D_c [mm] | d_p [mm] | D_c/d_p [-] | Φ [-] | | |
| BLYAKHER & Col. [8] | — | — | — | 90 180 | — | — | 9,02 | 0,41 | $(-\Delta P) = \xi_g \frac{U_g^2 \rho_g}{2} + (1-\epsilon_0) (\rho_p - \rho_g) g H_{st} + \xi_f U_g^{1,75} U_1^{0,5} + \xi_b U_1 H_{st}$ <p>ξ_g, ξ_f, ξ_b sont des constantes</p> | Type I |
| GELPERIN & Col. [21] | — | — | — | 160 900 | — | 1,7 61,7 | — | 0,345 0,70 | $(-\Delta P) = \xi_g \frac{U_g^2 \rho_g}{2(1-\tau)} + (1-\epsilon_0) \rho_p g H_{st} + 0,138 U_1^{0,5} H_{st}^{0,75} d_p^{-0,6} \rho_l g + F_\sigma$ | Type I et II |
| LEVSH & Col. [44] | — | — | — | 1083 | — | — | — | — | $(-\Delta P) = (1-\epsilon_0) \rho_p g H_{st} + 14,0 U_1^{0,55} U_g (14,29 H_{st})^m + F_\sigma + F_g$ <p>Pour $U_1 < 0,008$ m/s, $m = (0,75 + 0,8)$; pour $0,008 < U_1 < 0,017$, $m = 1$</p> | Type II |
| BARILE & MEYER [6] | — | — | 15,2 53,3 | 109 160 | 142,8 285,7 | 19,05 | 7,5 15 | 0,82 | $\frac{(-\Delta P)}{g} = (1-\epsilon) \rho_p H_{st} + \epsilon_{lmf} \rho_l H_{st}$ | Type I |
| TYCHY & Col. [59] | — | — | — | 155 | — | — | 11,4 7,5 | 0,78 | $\log_{10} \left[\frac{2\rho_g (-\Delta P) D_c}{G_g^2 H_{st}} \frac{1}{1 + CG_1} \right] = 4,003 - 2,240 G_g + 0,840 G_g^2 - 0,127 G_g^3$ <p>C est une constante</p> | Type I et II |

CHAPITRE II : Hydrodynamique et transfert de matière

Suite du tableau 2 : Correlations pour le calcul des pertes de charge (ΔP)

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|--------|---|------------------|-----|------------|----------------------|------|---|-----------------|
| KITO & Col. [34] | — | — | — | 170 1250 | — | — | 3,6 10,3 | — | $\frac{(-\Delta P)}{g} = (1 - \epsilon_0) \rho_p H_{st} + \epsilon_{1,st} \rho_l H_{st}$ | Type I et II |
| USCHIDA & Col. [62] | 0+4 | 8,3+25 | — | 170 | 195 | 12,7 19 | — | — | $(-\Delta P) = (1 - \epsilon_0) \rho_p g H_{st} + 9,38 \cdot 10^8 \mu_l^{2,3} f^{-0,42} \left(\frac{d_0}{D_c}\right)^{-0,84} d_p^{-0,84} \rho_p^{0,18} H_{st} U_l + 7,88 U_g^{2,91} U_l^{1,27}$ | Type I |
| WOZNIAK [72] | — | — | — | 266 | — | — | 10,2 | 0,6 | $\frac{-\Delta P}{\rho_g U_g^2} = 4,672 \cdot 10^5 \left(\frac{H_{st}}{D_c}\right)^{-1,798} \left(\frac{d_p U_l \rho_l}{\mu_l}\right)^{0,8261} + \frac{(1 - \epsilon_0) \rho_p g H_{st}}{\rho_g U_g^2}$ | Type I et II |
| RAMA & Col. [53] | — | — | — | 53 112 183 | — | — | 3,91 4,80 6,33 | 0,70 | $\frac{(-\Delta P)}{g} = (1 - \epsilon_0) (\rho_p - \rho_g) H_{st} + \epsilon_{1,st} \rho_l H_{st}$ | Type I et II |
| VUNJAK- NOVAKOVIC & Col. [68] | — | — | — | 182 980 | — | 3,68 29 | 0,36 0,52 0,78 | — | $\frac{(-\Delta P)}{g} = (1 - \epsilon_0) \rho_p H_{st} + (\epsilon_{1,st} - 0,02) \rho_l H_{st}$ | Type I et II |

Le bilan matière pour le même garnissage à l'état statique et à l'état dilaté donne:

$$A.H_{st}(1-\varepsilon_0) = A.H_d(1-\varepsilon_g-\varepsilon_l) \quad (\text{II.6})$$

où:

A est la section droite de la colonne, H_{st} et H_d étant respectivement la hauteur statique et la hauteur dynamique du lit.

En posant :

$$\varepsilon_d = \varepsilon_g + \varepsilon_l \quad (\text{II.7})$$

il vient:

$$A.H_{st}(1-\varepsilon_0) = A.H_d(1-\varepsilon_d) \quad (\text{II.8})$$

La rétention liquide ε_l , ou fraction de la phase liquidée, est reliée à la rétention liquide exprimée par rapport au volume du lit à l'état statique, $\varepsilon_{l,st}$, par la relation:

$$\varepsilon_l = \left(\frac{H_{st}}{H_d} \right) \varepsilon_{l,st} \quad (\text{II.9})$$

La rétention liquide rapportée au lit à travers l'état statique $\varepsilon_{l,st}$ consiste en la rétention liquide opératoire ($\varepsilon_{l,op}$) et en la rétention statique ($\varepsilon_{l,st,st}$) qui représente la quantité de liquide retenue par les forces d'adhésion sur les particules du garnissage solide.

$$\varepsilon_{l,st} = \varepsilon_{l,op} + \varepsilon_{l,st,st} \quad (\text{II.10})$$

La rétention liquide statique $\varepsilon_{l,st,st}$ est indépendante du diamètre des particules et est égale à 0,02 m³/m³ (Chen et Douglas [10], Vunjak-Novakovic [66]).

II.1.2.2 Revue bibliographique.

Gel'perin [21] définit deux rétentions, celle près de la grille support, et celle dans le lit fluidisé. Il présente une équation empirique pour cette dernière qui montre que la porosité du lit statique $\varepsilon_{l,st}$ est affectée par la hauteur statique du garnissage, qu'elle était indépendante de la vitesse du gaz, mais augmentait avec le débit liquide et avec la diminution de la dimension du garnissage.

Chen et Douglas [10] trouvèrent que la rétention liquide ε_l était indépendante de vitesse du gaz et augmentait avec le débit liquide et la diminution du diamètre des particules.

Barile et Meyer [6] présentèrent une corrélation pour calculer $\varepsilon_{l,ST}$ tenant compte de l'effet de la hauteur statique.

Balabekov [3] déduisit une corrélation qui tient compte du stade de fluidisation selon qu'elle soit partielle ou développée.

Kito [33], [34], [35] et Kuroda et Tabei [41] étudièrent l'effet de section libre de grille de la grille support sur $\varepsilon_{l,ST}$.

Gel'perin et Kruglyakov [25] obtinrent une équation empirique pour $\varepsilon_{l,ST}$ des garnissage de masse volumique 430 kg/m^3 qui tient compte du stade de fluidisation.

Rama et col. [53] proposa une corrélation pour $\varepsilon_{l,ST}$ tenant compte de la fraction libre de la grille support.

Vunjak-Novakovic [66] en tenant compte du modèle hydrodynamique proposé par O'Neil [50] proposa des corrélations pour calculer la rétention liquide pour les types I et II. A.C.T. Plus récemment en 1987 le même auteur confirma les résultats précédents, notamment pour le Type II.A.C.T en comparant les valeurs expérimentales et les valeurs calculées pour deux types de garnissage. Il souligna notamment le fait que c'est uniquement la rétention liquide opératoire $\varepsilon_{l,ST}$ qui intervient pour la perte de charge dans le lit.

Le tableau 3 résume les différentes corrélations proposées par les auteurs ainsi que les conditions opératoires.

La figure 8 présente une comparaison de la rétention liquide estimées à partir de certaines corrélations données dans le tableau. Comme le montre la figure 8, aux faibles vitesses superficielles de liquide les écarts relatifs entre les différentes prédictions est assez significatif et diminue quand la vitesse du liquide augmente.

II.1.3. Rétention de gaz.

Les études concernant la rétention de gaz sont relativement peu nombreuses.

II.1.3.1 Généralités.

En combinant les équations (II.5), (II.6) et (II.8) on obtient l'expression de la rétention du gaz ε_g :

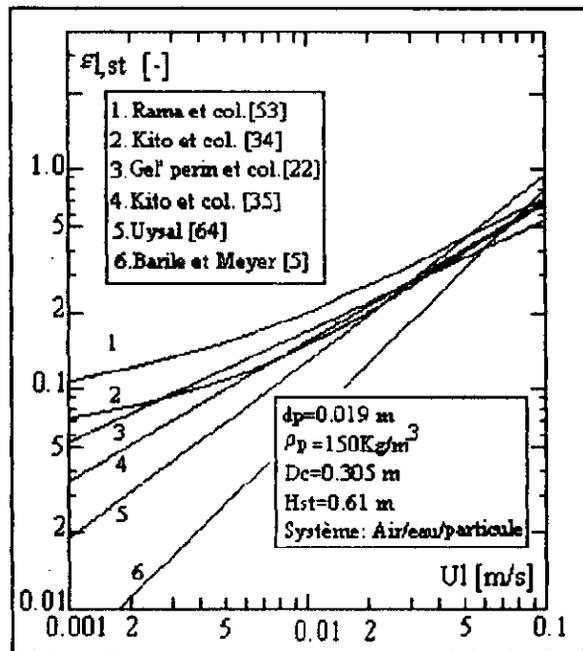


Figure 8 : Comparaison des valeurs de $\epsilon_{l, st}$ obtenues par différentes corrélations (Fan L, S. [18])

$$\epsilon_g = 1 - \frac{H_{st}}{H_d} \epsilon_{l, st} + (1 - \epsilon_0) \quad (II.10)$$

La rétention de gaz peut être déterminée, lorsque la hauteur, et la rétention liquide sont connues (Balabekov [3]):

$$\epsilon_g = 1 - \frac{h_l}{H_d} - \frac{(1 - \epsilon_0)H_{st}}{H_d} \quad (II.11)$$

où

- h_l est la hauteur de liquide dans la colonne correspondant à la rétention liquide dans le lit.

II.1.3.2 Revue bibliographique.

Balabekov en 1969 [3] montra que la rétention de gaz augmentait avec la vitesse superficielle du gaz, mais était presque indépendante de la vitesse superficielle du liquide, pour un débit de gaz constant.

Tableau 3: Corrélations pour le calcul de la rétention liquide (ϵ_l)

| AUTEURS | CONDITIONS OPERATOIRES | | | | | | | | CORRELATIONS en unités S.I | Type de régime |
|------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------|---|----------------|
| | U_g (m/s) | L (kg/m ² .s) | H _{st} (mm) | ρ_p (kg/m ³) | D _c (mm) | d _p (mm) | D _c /d _p [-] | ϕ [-] | | |
| Chen & Douglas [10] | 0+3 | 2,8+3,9 | 305 | 156 170 | 305 x 305 | 12,7 38,1 | 8 123 24 | 0,46 | $\epsilon_l = 0,02 + 2,371 \cdot 10^3 L^{0,6} d_p^{-0,5}$ | Type I |
| Aksel'rod & Yakovenko [1] | 1+7,5 | 1,4+41,7 | 45 22,5 | 380 | 150 | 16 | — | 0,3 0,65 | $\epsilon_l = 3,9 \cdot 10^{-2} L \frac{\rho_p}{\rho_l}$ | Type II |
| Balabekov [2] | 0,1+8 | 0+34,7 | 38 300 | 356 1036 | 175 | 6+22 | 8+29,2 | 0,3 0,6 | $\epsilon_{l,st} = \left[C \cdot 0,828 \left(\frac{L}{U_g} \right)^2 \frac{\rho_p}{\rho_l} \right]^{k+1} (1-\epsilon_0) \frac{\rho_p}{\rho_l}$ <p>Pour fluidisation partielle: C = 0,05; k = 0,8</p> <p>Pour fluidisation développée: $C = \frac{0,695}{f^3} \left(\frac{0,05}{d_p} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{-0,74} \left(\frac{L}{10^2} \right)^2$; $k = \frac{1,58}{f^{0,16}} \left(\frac{0,005}{d_p} \right)^{-0,1}$</p> | Type II |
| Barile & Meyer [6] | — | — | 15,2 + 53,3 | 109 160 | 142,8 285,7 | 19,05 | 7,5 15 | 0,3 0,8 | $\epsilon_{l,st} = 1,160 \left(\frac{L^2}{d_p g \rho_l^2} \right)^{0,78} \left(\frac{d_p L}{\mu_l} \right)^{-0,51} \left(\frac{H_{st}}{d_p} \right)^{-0,36}$ | Type I |
| Uysal [64] | — | — | — | 157 | — | — | 7,6 + 15,3 | 0,87 | $\epsilon_{l,st} = 1,15 \cdot 10^{-4} 10.826 d_p^{-1,289}$ | Type I |
| Rama & Col. [53] | — | — | — | 53 112 183 | — | — | 3,95 4,80 6,33 | 0,7 | $\epsilon_{l,st} = 0,086 + 11 \left(\frac{H_{st}}{d_p} \right)^{-0,4} f \left(\frac{d_0}{D_c} \right)^{-0,58} \left(\frac{g d_p^3 \phi^3 \rho_p^2}{\mu_l^2} \right)^{0,09}$ | Type I |

Suite du tableau 3: Corrélations pour le calcul de la rétention liquide (ϵ_l)

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|---------|-----------|-------------|-------------|----------|------|----------------------|--|-----------------|
| Vurjak Novakovic [67] | — | — | — | 182 980 | — | — | 3,68 | 0,36 0,52 0,78 | $\epsilon_{l,st} = 2,48 \cdot 10^{-3} \left(\frac{H_{st}}{D_c} \right)^{-0,567} d_p^{-0,568} L^{0,719} + 0,02$ $\epsilon_{l,st} = 7,33 Re_l^{-0,069} Fr_l^{0,435} \left(\frac{H_{st}}{D_c} \right)^{-0,433} \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{0,090} + 0,02$ | Type I et II |
| Tarat & Col. [58] | 0+5 | 0+11,1 | — | 2,6 | 1000 400 | 36 | — | 0,4 | $\epsilon_{l,st} = \frac{8,38}{H_{st}} \cdot 10^{-2} L^{0,94} U_g^{1,04} \rho_g^{1,04}$ | Type I et II |
| Petrov & Tassaev [52] | 18+5,7 | 2,8+8,3 | 40 400 | 448 1025 | 290 | 20 38 | — | 0,36 0,78 | $\epsilon_{l,st} = 8,9 \cdot 10^{-4} U_g^{0,13} L^{0,4} H_{st}^{-0,7} d_p^{-0,6} f^{0,5} \rho_p^{0,02}$ $\epsilon_{l,st} = 1,0 \cdot 10^{-4} U_g^{1,3} L^{0,5} d_p^{-0,6} f^{0,6} \rho_p^{0,02}$ | Type II |
| Tichy & Col [61] | 0+3,5 | 0+31,9 | 87 290 | 200 400 | 290 | 20 38 | — | 0,36 0,78 | $\epsilon_{l,st} = C \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right) L(1 - \epsilon_0)$ $\frac{H_{st}}{D_c} = 1; C = 0,39$ $\frac{H_{st}}{D_c} = 1,5; C = 0,29$ $\frac{H_{st}}{D_c} = 2; C = 0,28$ | Type I et II |

Suite du tableau 3 : Corrélations pour le calcul de la rétention liquide (ϵ_l)

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|----------|------------|-------------|------------|--------------|------------------|-------------------|--|--------------------|
| Handl [27] | 0÷7 | 2,8÷28 | 140 350 | 155 458 | 140 | 12,3 18,7 | — | 0,78 | $\epsilon_{l,st} = 26,8 \epsilon_0 Re_1^{-0,189} Fr_1^{0,474}$ | Type II Prévaut |
| Gel'Perin [22] | 0,5÷8 | 5,6÷66,7 | — | 169 910 | 60 370 | 6 35,5 | 1,7 ÷ 61,7 | 0,35 ÷ 0,70 | $\epsilon_{l,st} = 4,36 \cdot 10^{-3} L^{0,5} H_{st}^{-0,25} d_p^{-0,6}$ | |
| Gel'Perin & Kruglyakov [25] | 0÷4 | 0÷16,7 | — | 430 | 175 | — | 11,1 | 0,37 0,60 | $\epsilon_{l,st} = \frac{0,73}{\rho_l} L^{0,31} H_{st}^{-0,78} (C + 4,54 H_{st}^{0,78})$ | Type I |
| Uchida & Col. [62] | 0÷4 | 8,3÷50 | — | 170 | 195 | 12,7 19 | — | — | $\epsilon_{l,st} = \frac{9,38 \cdot 10^{-9}}{g \rho_l} \mu_1^{2,3} f^{0,42} \left(\frac{d_o}{D_c}\right)^{-0,84} \rho_p^{0,18} L$ | Type I |
| Gel'Perin & Col. [19] | 15÷4,5 | 2,8÷16,7 | — | 100 1250 | 200 550 | 20 30 | — | 0,3 0,5 | $\epsilon_{l,st} = 5,47 \cdot 10^{-2} U_g^{0,24} \cdot L^{0,14} H_{st}^{-0,06} \rho_l^{-1} \rho_p^{-0,1}$ | Type I et II |
| Kito & Col. [33] | — | — | 100 300 | 170 1250 | — | 9,5 28,5 | 3,6 10,3 | 0,71 0,84 | $\epsilon_{l,st} = 0,06 + 3,018 \cdot 10^{-3} f \left(\frac{d_o}{D_c}\right)^{-0,84} dp^{-0,84} \rho_p^{0,18} H_{st}^{-0,4} U_l$ | Type II |
| KIto & Col. [34] | — | — | 100 300 | 170 1250 | — | 9,5 28,5 | 3,6 10,3 | 0,71 0,84 | $\epsilon_{l,st} = 12,8 \left(\frac{H_{st}}{d_p}\right)^{-0,4} \left(\frac{d_o}{D_c}\right)^{-0,58} \left[\frac{d_p^3 \rho_p^2}{g \mu_1}\right]^{0,09} \left[\frac{U_l}{\sqrt{g d_p}}\right]^{1,66} \left[\frac{dp U_l \rho_l}{\mu_1}\right]^{-0,34} \left[\frac{dp U_l \rho_l}{s}\right]^{-0,34}$ | Type II |

Kito et col. [35], mesurèrent la rétention de gaz pour une gamme représentative de variation des différentes conditions opératoires et observèrent les mêmes effets que ceux rapportés par Balabekov [3]. Il conclurent également que la rétention de gaz était presque indépendante du liquide, de la hauteur statique du lit, de la fraction libre de grille support et du diamètre des orifices de la grille support.

Vunjak-Novakovic [67] proposa des corrélations pour le calcul de la rétention de gaz pour les stades de fluidisation partielle et fluidisation développée pour les deux régimes de fonctionnement d'un absorbeur à contact turbulent.

L'auteur en introduisant la vitesse interstitielle du gaz U'_g , montra que dans le cas de la fluidisation développée, la relation pour le calcul de ε_g était identique pour les deux régimes de fluidisation (type I et II ACT).

Les différentes corrélations proposées pour le calcul de la rétention de gaz ainsi que les conditions opératoires dans lesquelles elle ont été déduites, sont résumées dans le tableau 4.

La figure 9 présente une comparaison entre les rétentions de gaz estimées par différentes corrélations. Les valeurs prédites par les équations de Kito et col. [31], [34], [35] sont sensiblement similaires car leurs corrélations sont basées sur un grand nombre de données expérimentales et sont exprimées en variables adimensionnelles.

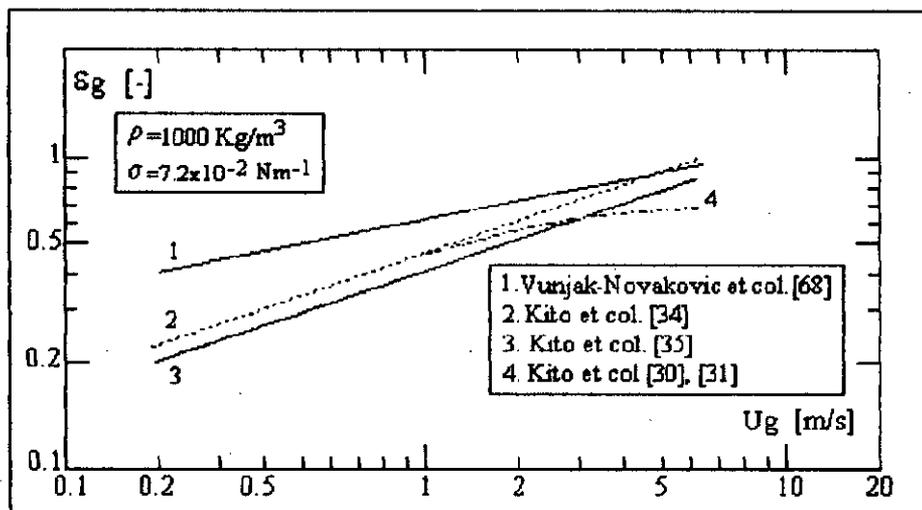


Figure 9 : Comparaison des valeurs de ε_g obtenues par différentes corrélations (Fan L., S. [18])

Tableau 4 : Corrélations pour le calcul de la rétention de la phase gazeuse (ϵ_g):

| AUTEURS | CONDITIONS OPERATOIRES | | | | | | | | CORRELATIONS EN UNITES S.I | Type de régime |
|--------------------------|------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------------|---------------|------------------|-------------------|----------------------|---|--------------------|
| | U_g [m/s] | L [kg/m ² s] | H_{st} [mm] | ρ_p [kg/m ³] | D_c [mm] | d_p [mm] | D_c/d_p [-] | ϕ [-] | | |
| GELPERIN et Col. [21] | 0,5 ÷ 8 | 5,6 ÷ 66,7 | — | 169 310 | 60 370 | 6 ÷ 35,5 | 1,7 ÷ 61,7 | 0,35 ÷ 0,70 | $\epsilon_g = 0,93 \left[\frac{d_p U_g^* \rho_g}{\mu_g} \right]^{0,4} \left[\frac{d_p^3 (\rho_p - \rho_g) \rho_g}{\mu_g^2} \right]^{-0,2}$ (avec $U_g^* = \frac{U_g}{1 - \epsilon_{Lst}(H_{st}/H_d)}$) | Type II Prévaut |
| KITO et Col. [31] | 1,5 ÷ 4,5 | 2,8 ÷ 16,7 | — | 170 1250 | — | 9,5 ÷ 28,5 | 3,6 ÷ 10,3 | 0,71 ÷ 0,84 | $\epsilon_g = 0,417 U_g^{0,44}$ | Type II |
| KITO et Col. [34] | — | — | — | 300 1100 | — | — | 1,89 ÷ 9,09 | 0,127 ÷ 0,3155 | $\frac{\epsilon_g}{(\epsilon_g(1 - \epsilon_g)^{0,2})^{0,44}} = 0,5 \left[\frac{D_c U_g^2 \rho_l}{\sigma} \right]^{0,11} \left[\frac{U_g}{\sqrt{g D_c}} \right]^{0,22}$ | Type II |
| KITO et Col. [35] | — | — | 100 300 | 170 1250 | — | 9,5 ÷ 28,5 | 3,6 ÷ 10,3 | 0,71 ÷ 0,84 | $\epsilon_g = 0,19 \left[\frac{d_p U_g^2 \rho_l}{s} \right]^{0,11} \left[\frac{U_g}{\sqrt{g D_c}} \right]^{0,20}$ | Type II |

Suite du tableau 4 : Corrélations pour le calcul de la rétention de la phase gazeuse (ϵ_g):

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|------------|---|---|------|----------------------|---|--------------|
| VUNJAK- NOVAKOVIC [67] | — | — | — | 182 980 | — | — | 3,68 | 0,36 0,52 0,78 | $\epsilon_g = \frac{U_g}{U_{g_{mf}}} \cdot \epsilon_0 - 2,48 \cdot 10^{-3} \left(\frac{H_{st}}{D_c} \right)^{-0,567} d_p^{-0,568} L^{0,719} - 0,02$ (fluidisation partielle) | Type I |
| | | | | | | | | | $\epsilon_g = \frac{U_g}{U_{g_{mf}}} \cdot \epsilon_0 - 4,43 \cdot 10^{-3} \left(\frac{H_{st}}{D_c} \right)^{0,433} d_p^{-0,494} L^{0,812} \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{0,090} - 0,02$ (fluidisation partielle) | Type II |
| | | | | | | | | | $\epsilon_g = 0,628 \cdot U_g^{0,237}$ (fluidisation totale) | Type I et II |

II.1.4 Vitesse minimum fluidisation

Avec l'augmentation de la vitesse superficielle de gaz le lit de garnissage passe d'un état fluidisé.

Cette transition est quelque peu mal définie et en conséquence, plusieurs définitions de la vitesse minimum fluidisation sont avancées.

II.1.4.1. Modèles proposés

En se basant sur les courbes représentant les pertes de charge en fonction de la vitesse superficielle du gaz, Begovitch [7] détermine la vitesse minimum de fluidisation par l'intersection des droites caractérisant le lit fixe et le lit fluidisé.

Chen et Douglas [10], Tichy et Douglas [61], définissent la vitesse minimum de fluidisation comme étant la vitesse du gaz à laquelle le lit commence à se dilater. Ce point est défini comme étant le point d'inflexion de la courbe représentant l'évolution du rapport des hauteurs de lit dynamique et statique.

Kito [30], [33], définit la vitesse minimum de fluidisation comme étant la vitesse de gaz à laquelle l'augmentation rapide de la perte de charge se stabilise et s'approche d'une valeur constante.

La mise en fluidisation d'un lit triphasique est graduelle et se fait par couches successives de garnissage; Vunjak-Novakovic [68] définit une vitesse minimum de fluidisation pour le lit fluidisé U_{gmf} et la vitesse minimum de fluidisation à partir de laquelle le lit est entièrement fluidisé U_{gmfd} .

Il existe plusieurs modèles pour la prédiction de la vitesse minimum de fluidisation.

Le modèle proposé par Kuroda et Tabei [41] est basé sur l'application du modèle unidimensionnel du système diphasique proposé par Wallis [69] pour obtenir la perte de charge dynamique en terme de coefficient de friction apparent C_{ff} pour les deux systèmes; à lit fixe et à lit fluidisé aux conditions de minimum de fluidisation, et aboutit à la relation:

$$U_{gmf} = \left[\frac{d_p}{C_{ff} \cdot \rho_g} \cdot \varepsilon_{gmf}^3 (\rho_{ws} - \rho_g) \cdot g \right]^{1/2} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$C_{fi} = C_{fs}(1 + 800 \cdot \varepsilon_{lmf}^3) \quad (\text{II.13})$$

$$C_{fs} = 1,75 + 150 \left[\frac{(1 - \varepsilon_g)}{(d_p U_g \rho_g) / \mu_g} \right] \quad (\text{II.14})$$

$$\rho_{ws} = \frac{\varepsilon_{lst} \rho_l + \rho_p (1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon_0) + \varepsilon_{lst}} \quad (\text{II.15})$$

Le modèle proposé par Vunjak-Novakovic [68] repose sur la définition des deux régimes de fonctionnement du contacteur à lit turbulent (types I et II A.C.T) et l'auteur propose des corrélations permettant de calculer U_{gmf} pour les deux types de régime. Pour le calcul de la vitesse minimum à partir de laquelle le lit est entièrement fluidisé (U_{gmfd}), l'auteur propose une corrélation valable pour les deux types de régime:

$$U_{gmfd} = 0,545 \left[\frac{U_{gmf}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{lst}} \right]^{1,31} \quad (\text{II.16})$$

II.1.4.2 Revue bibliographique

La plupart des corrélations disponibles dans la littérature sont souvent empiriques et présentent de substantielles différences dans les prédictions.

D'après Chen et Douglas [10], Kito et Col. [33], Vunjak-Novakovic et Col. [66], Kuroda et Tabei [41], la vitesse minimum décroît généralement quand la vitesse superficielle (U_1) du liquide augmente, et lorsque le diamètre des particules de garnissage (d_p) diminue.

D'après Balabekov et Col. [2], Kito et Col. [33], la hauteur du lit statique n'influence pas la vitesse minimum de fluidisation.

L'importance des facteurs U_1 et d_p varie suivant les auteurs et l'effet de la valeur de masse volumique du garnissage et de la fraction de vide de la grille support est parfois différent suivant les auteurs. Gel'Perin [21] souligne que la vitesse du gaz au minimum de fluidisation U_{gmf} est indépendante de la masse volumique du garnissage, alors que Chen et Douglas [10] suggèrent une dépendance.

D'après Kito et Col. [33] la vitesse minimum de fluidisation augmente avec l'augmentation de la masse volumique du garnissage pour les deux types de régimes de fonctionnement de l'absorbeur à contact turbulent.

La géométrie du système expérimental et spécialement la fraction de vide de la grille support affectent la valeur de la vitesse minimum de fluidisation. Kito et Col. [33] montra que la vitesse minimum de fluidisation augmente quand le pourcentage de vide de la grille support augmente, et en devient indépendante si le rapport f_d/D_c est supérieur à 0,05.

Les corrélations pour estimer la vitesse minimum de fluidisation (U_{gmf}) sont résumées dans le tableau 5.

La figure 10 montre une comparaison entre les valeurs estimées de U_{gmf} par différentes corrélations. Les estimations à partir des corrélations proposées par Tichy et Douglas [10], Khana [29] Uysal [64] et Leung [43], conduisant à des valeurs assez faible pour la vitesse minimum de fluidisation à partir d'une vitesse superficielle du liquide (U_l) supérieure à 0,02 m/s.

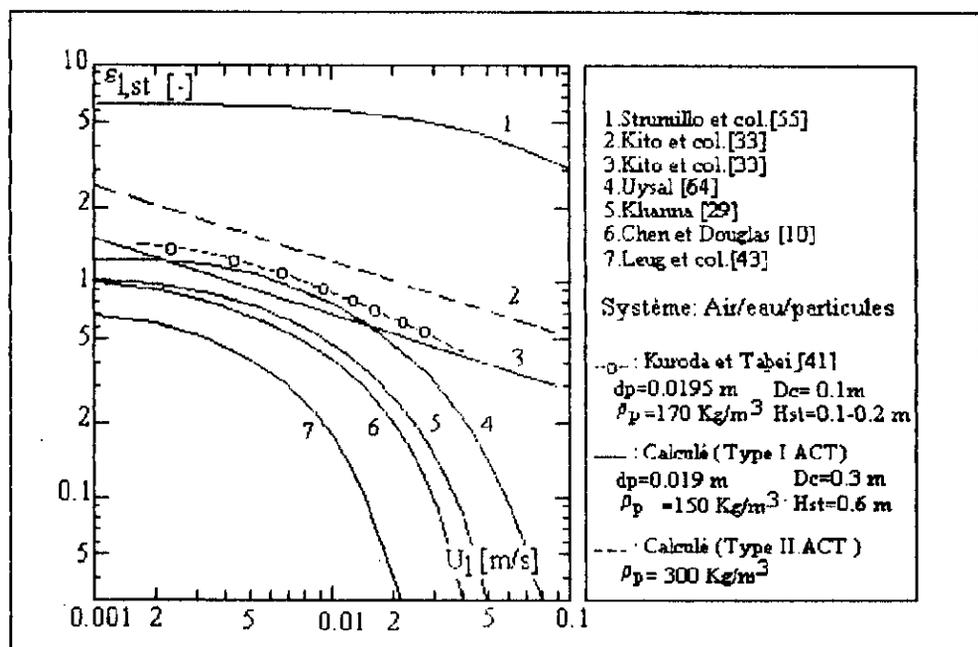


Figure 10 : Comparaison des valeurs estimées de U_{gmf} par différentes corrélations
(Fan L... S. [19])

Tableau 5: Corrélation pour le calcul de la vitesse minimum de fluidisation (U_{gmf}) :

| AUTEURS | CONDITIONS OPERATOIRES | | | | | | | | CORRELATIONS EN UNITES S.I. |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------|---------------|------------------|------------------|---|
| | U_g [m/s] | L [Kg/m ² s] | Hst [mm] | ρ_p [kg/m ³] | D_c [mm] | d_p [mm] | D_c/d_p [-] | φ [-] | |
| Gel'Perin et Col. [21] | | | | 250 500 | | | | 0,345 | $U_{gmf} = 0,3837 U_1^{-0,28}$ |
| Blyakher et Col. [7] | | | | 90 180 | | 9,02 | 0,41 | | $U_{gmf} = U_{gmf0} \left[1 + \frac{1,787 U_1^{0,9}}{37,5 + 1,587 U_1^{0,9}} \right]$ avec $U_{gmf0} = \frac{0,0579 d_p^{0,715} (\rho_p - \rho_g)^{0,572}}{\mu_g^{0,143} \rho_g^{0,429}}$ |
| Chen et Douglas [10] | 0 - 3 | 2,8 - 13,9 | 305 | 156 170 | 305 x 305 | 12,7 38,1 | 8 123 24 | 0,46 | $G_{mf} = 120,4 d_p^{1,15} 10^{-0,03812L}$ |
| Balabekov et Col. [2] | 0,1 - 8 | 0 - 34,7 | 38 300 | 356 1036 | 175 | 6 - 22 | 8 - 29,2 | 0,3 0,6 | $Re_{gmf} = \frac{d_p U_{gmf} \rho_g}{\mu_g} = 142 \varphi \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{0,33} \left(\frac{0,005}{d_p} \right)^{-2,2} \exp \left\{ -7,3 \times 10^{-6} \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} \right)^{0,33} \left(\frac{0,005}{d_p} \right)^{1,14} \left(\frac{2 d_p L}{3 \mu_l (1 - \epsilon_0) d_p} \right) \right\}$ |
| Gel'Perin et Col. [19] | 1,5 - 4,5 | 2,8 - 16,7 | | 100 1250 | 200 550 | 20 30 | | 0,3 0,5 | $\frac{U_{gmf}}{g d_p} = C \varphi^{1,54} \exp \left\{ -12,6 \left(\frac{U_1}{U_{gmf}} \right)^{0,25} \right\}$ Pour $d_p = 3, 4, 6$ mm ; $C = 4,6 \times 10^{-3}$ Pour $d_p = 2$ mm ; $C = 2,8 \times 10^{-3}$ |
| Uysal [64] | | | | 157 | | | 7,6 - 15,3 | 0,87 | $G_{mf} = 10,86 d_p^{0,488} 10^{-0,01985L}$ |

Suite du tableau 5 : Corrélation pour le calcul de la vitesse minimum de fluidisation (U_{gmf}) :

| | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|-------------------|--|--|----------------------|-------------------|---|
| Khanna, [29] selon Uysal, [64] | | | | 155 458 | | | 3,7 - 11 | 0,7 | $G_{mf} = 526,46 d_p^{1,5} 10^{-0,0317L}$ |
| Tichy et Douglas [60] | | | | 155 234 458 | | | 3,7 - 11 | 0,7 | $G_{mf} = 0,36355 + 57,90 d_p - 1,848 L^{0,6} d_p^{0,5}$ |
| Leung et Col.[43] | | | | | | | | | $G_{mf} = \left[0,5002 (d_p \rho_l \rho_g)^{0,25} - L^{0,25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,25} \right]^2$ |
| Strumillo et Col. [55] | | | | 470 - 1050 | | | 8,5 11,33 17,0 | 0,66 | $U_{gmf} = (13,3 D_c = 2,24) \exp \left[- \frac{3,6 U_l}{D_c^{0,04}} \right]$ |
| Kito et Col. [33] | | | | 170 - 1160 | | | 3,5 - 8,62 | 0,04 - 0,84 | $\frac{U_{gmf}}{U_{gmf0}} = 0,5983 \left(\varphi \frac{d_0}{D_c} \right)^{0,46} U_l^{-0,36} \quad \text{Pour} \quad \left(\varphi \frac{d_0}{D_c} \right)^{0,46} \leq 0,05$ $\frac{U_{gmf}}{U_{gmf0}} = 0,1486 U_l^{-0,36} \quad \text{Pour} \quad \left(\varphi \frac{d_0}{D_c} \right)^{0,46} > 0,05$ U_{gmf0} peut être estimée en utilisant l'équation d'Ergun, (Kunii and Levenspiel, 1969, [40]) |

Suite du Tableau 5: Corrélation pour le calcul de la vitesse minimum de fluidisation (U_{gmf}) :

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-------------|-----|------------------------|----------------------|-----|--|
| Kuroda et Tabei. [41] | --- | --- | --- | 170 1160 | --- | --- | 3,51 8,62 | --- | $C_{fi} \left(\frac{\rho_g U_{gmf}^2}{d_p} \right) = (\rho_{ws} - \rho_g) g$ $\rho_{ws} = \left(\frac{\epsilon_{1st}}{1 - \epsilon_0} \right) \rho_l + \rho_p$ <p>$C_{fi} = C_{fs} (1 + 800 \epsilon_{1mf}^3)$ (C_{fi} : Coefficient de friction apparent)</p> <p>$C_{fs} = 1,75 + 150 \left(\frac{1 - \epsilon_g}{Re_g} \right)$ (C_{fs} : Coefficient de friction dans le lit fixe gaz-liquide)</p> |
| Vunjak-Novakovic [68] | --- | --- | --- | 182 980 | --- | 3,68 2 ^o | 0,36 0,52 0,78 | --- | <p>Pour le type I :</p> $U_{gmf} = 11,3 \cdot dp \cdot \left\{ (1 - \epsilon_0)(\rho_p - \rho_g) + 4,903 \times 10^{-5} \rho_l dp^{-0,568} \cdot 1,0719 \cdot 10^{-0,04788 G_1} \right\}^{0,5}$ <p>Pour le type II :</p> $\log_{10} \left(\frac{U_{gmf}^2}{g} \cdot \frac{\rho_p \rho_g}{\epsilon^3 \rho_l} \right) = 0,247 - 1,615 \left(\frac{L}{G_{mf}} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,125}$ |

La diversité des résultants peut être attribuée d'une part aux différentes méthodes expérimentales utilisées par les différents auteurs pour déterminer la vitesse minimum de fluidisation et d'autre part à la différence dans le comportement hydrodynamique des deux régimes de fonctionnement du contacteur à lit turbulent.

Le mécanisme de fluidisation proposé par O'Neil [50] a donné une base théorique pour établir une théorie pour le commencement de fluidisation.

D'une manière générale pour le type (I.A.C.T.), la vitesse minimum de fluidisation peut être obtenue en égalisant la perte de charge dans le lit avec le poids des particules et de la rétention liquide, et par conséquent la vitesse minimum de fluidisation devrait augmenter avec l'accroissement de la masse volumique du garnissage.

Pour le type (II.A.C.T.), la vitesse minimum de fluidisation est égale à la vitesse d'engorgement du lit fixe et ne devrait donc pas être affectée par la valeur de la masse volumique du garnissage.

I.1.5. Expansion du lit

L'expansion du lit est un paramètre important pour le calcul de conception de l'absorbeur à contact turbulent, notamment pour le calcul de l'espacement entre la grille support du garnissage et le distributeur du liquide.

II.1.5.1. Définitions. Généralités

On appelle expansion du lit le rapport entre la hauteur dynamique du lit (hauteur du lit à l'état dilaté) et la hauteur statique du garnissage.

Le bilan volumique pour la phase solide et la phase liquide donne:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = \frac{\epsilon_{l,st} + \epsilon_{s,st}}{1 - \epsilon_g} \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{H_d}{H_{st}} = \frac{\epsilon_{l,st} + 1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon_0} \quad (\text{II.18})$$

O'neil [50] a proposé une expression basée sur le bilan volumique de la phase solide:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = \frac{\epsilon_{s,st}}{\epsilon_s} = \frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon_d} \quad (\text{II } 19)$$

Suivant que l'on utilise l'une ou l'autre expression pour calculer l'expression, il faut au préalable connaître les rétentions du liquide, $\epsilon_{l,st}$ et celle du gaz, ϵ_g ou ϵ_d .

II.1.5.2. Résumé bibliographique

Les premières données sur l'expansion du lit furent publiées par Gel'perin et col. [19] en 1966, ils utilisèrent alors une grille support de faible ouverture (pourcentage de vide égal à 34,5 %).

Chen et Douglas [10] donnèrent une représentation graphique de l'expansion du lit. Ils montrèrent que l'expansion du lit augmente de manière linéaire quand la vitesse superficielle du liquide croît, et qu'elle augmente également quand la vitesse superficielle du gaz croît.

Tichy et Douglas [68] soulignèrent que l'expansion du lit était indépendante de la hauteur statique de garnissage et de la masse volumique de garnissage de faible masse volumique.

Des données expérimentales sur l'expansion du lit pour des garnissages de masse volumique relativement élevée (entre 470 et 2600 kg/m³) furent obtenues par Balabekov et col. [2] et Strumillo et col. [55].

Une rapide augmentation de l'expansion du lit a été observée pour le domaine où la vitesse du gaz approchait la vitesse d'engorgement du lit fluidisé, par Tichy et Douglas [61].

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la géométrie de la grille support de garnissage affecte fortement l'expansion du lit, Levsh et col. [44] Kito [30], [34], [35]. Pour les grilles ayant une faible ouverture, il se forme au dessus de la grille une couche de liquide créant une variation axiale de la rétention liquide. Levsh [44] proposa une corrélation reliant la hauteur dynamique du lit (H_d) avec la hauteur de la couche liquide.

Les corrélations pour l'expansion du lit sont proposées par les différents auteurs sont résumées dans le tableau 6.

La figure 11 montre la comparaison entre les valeurs de l'expansion estimées à partir de différentes corrélations. La figure montre que les corrélations proposées par, Uysal [64], et Kito et col. [34], prédisent l'expansion de manière assez proche des valeurs expérimentales. Les corrélations de Khanna [29] et Rama et Col. [53] sous-estiment l'expansion, alors que la corrélation de Vunjak-Novakovic et col. [66] la surestime de manière assez notable.

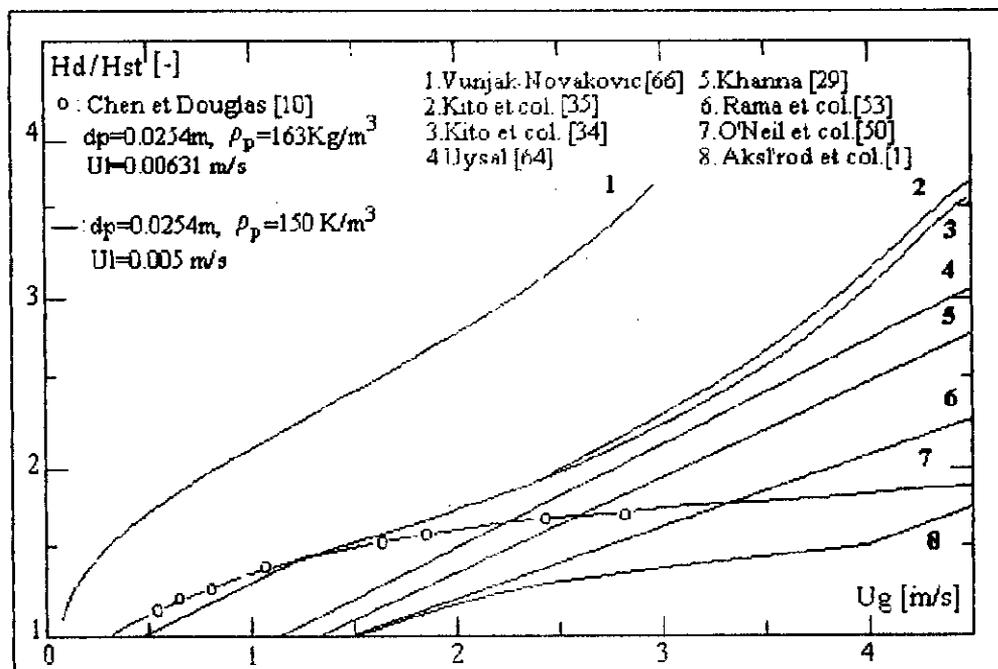


Figure 11: Comparaison des valeurs de Hd/Hst estimées par différentes corrélations
(Fan L. S. [19])

La plupart des corrélations ayant été déduites pour des domaines de variation des paramètres opératoires assez restreints, leurs généralisation est à vérifier.

En résumé, il existe deux types de corrélations. Certains auteurs ont proposé des corrélations purement empiriques. D'autres proposèrent des corrélations plus générales, se basant sur la définition de l'expansion du lit et qui nécessite la connaissance de la rétention liquide et gazeuse pour leur application.

Tableau 6 : Corrélation pour le calcul de l'expansion du lit (Hd/Hst) :

| AUTEURS | CONDITIONS OPERATOIRES | | | | | | | | CORRELATIONS EN UNITES S.I. | Type de régime |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|--|------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------|---|----------------|
| | U _g [m/s] | L [Kg/m ² s] | Hst [mm] | ρ _p [kg/m ³] | D _c [mm] | d _p [mm] | D _c /d _p [-] | φ [-] | | |
| Levsh et col. [46] | — | — | — | 1083 | — | — | — | — | $\frac{H_d}{H_{st}} = 4,40 \cdot U_1^{0,43} U_g^2 \quad (U_1 < 0,0078 \text{ m/s}, U_g < 2,5 \text{ m/s})$ $\frac{H_d}{H_{st}} = 2,28 \cdot U_1^{0,35} U_g^2 \quad (U_1 > 0,0078 \text{ m/s}, U_g > 2,5 \text{ m/s})$ | — |
| Balabekov et col. [2] | 0,1÷8 | 0÷34,7 | 38 300 | 356 1036 | 175 | 6÷22 | 8÷29,2 | 0,3 0,6 | $\frac{H_d}{H_{st}} = \left(\frac{(1-\epsilon_0) + \epsilon_{l,st}}{1-\epsilon_g} \right) = \left(\frac{\epsilon_{s,st} + \epsilon_{l,st}}{1-\epsilon_g} \right)$ | — |
| Gel'Perin et col. [21] | 0,5÷8 | 5,6 ÷ 66,7 | — | 169 910 | 60 370 | 6 35,5 | 1,7 ÷ 61,7 | 0,35 ÷ 0,70 | | — |
| Kito et col. [34] | — | — | 100 300 | 170 1250 | — | 9,5 28,5 | 3,6 10,3 | 0,71 0,84 | | — |
| Uchida et col. [62] | 0÷4 | 8,3÷25 | — | 170 | 195 | 12,7 19 | — | — | | — |
| Vunjak-Novakovic et col. [66] | — | — | — | 182 980 | — | 3,68 29 | 0,36 0,52 0,78 | — | | — |

Suite du tableau 6: Corrélation pour le calcul de l'expansion du lit (Hd/Hst) :

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|------------------|------------|-------------------|-----|----|----------------------|-------------|---|---------|
| Khanna [29] selon Uysal [64] | — | — | — | 157 | — | — | 7,6 + 15,3 | 0,87 | $\frac{H_d}{H_{st}} = 1 + 0,414 (G_g - G_{mf}) G_{mf}^{0,2}$ | — |
| Aks'rod et Yakovenko [1] | 1+7,5 | 1,4 + 41,7 | 45 22,5 | 380 | 150 | 16 | — | 0,3 0,65 | $H_d = 0,933 U_l^{0,3} H_{st}^{0,6} \left(\frac{U_g}{\phi}\right)^{0,93}$ Pour $\frac{U_{gl}}{\phi} \geq 6 \text{ m/s}$ $H_d = 0,933 U_l^{0,3} H_{st}^{0,6} \left(\frac{U_g}{\phi}\right)^{0,93}$ Pour $\frac{U_{gl}}{\phi} < 6 \text{ m/s}$ | — |
| Tichy et Douglas [60] | — | — | — | 155 234 458 | — | — | 3,7 11 | 0,7 | $\frac{H_d}{H_{st}} = 0,8849 + 0,3166 G - 18,33 dp + 0,5852 L^{0,6} dp^{0,6}$ | — |
| Uysal [64] | — | — | — | 157 | — | — | 7,6 15,3 | 0,87 | $\frac{H_d}{H_{st}} = 1 + 0,147 \frac{L - G_{mf}}{H_0}$ | — |
| O'Neil et col. [50] | — | — | — | — | — | — | — | — | $\frac{H_d}{H_{st}} = \left[\frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon} \right] = \left[\frac{\epsilon_{s,st}}{\epsilon_s} \right]$ Avec $\epsilon = \{K[(27 + 4K)/108]^{1/2} + K/2\}^{1/3} - \{K[(27 + 4K)/108]^{1/2} - K/2\}^{1/3}$ et $K = \frac{U_g^{1/2} + U_l^{1/2} (\rho_l / \rho_g)^{1/4}}{0,775 (gd_p \rho_l / 6 \cdot \rho_g)^{1/4}}$ | Type II |
| Rama et col. [53] | — | — | — | 53 112 183 | — | — | 3,95 4,81 6,33 | 0,7 | $\frac{H_d}{H_{st}} = 2,132 dp^{0,12} U_l^{0,31} + 1,02 dp^{-1,7} \rho_p^{-1,2} U_l^{0,2} U_g$ (Pour particules sphériques et régulières) $\frac{H_d}{H_{st}} = -1,07 + 43 U_l + 1,545 U_g$ (Pour particules de charbon) | — |

II.2. Transfert de matière.

Dans le contacteur à lit turbulent, les particules solides créent par leur mouvement turbulent intense, une grande aire interfaciale et un renouvellement rapide de l'interface gaz-liquide.

Ces deux phénomènes augmentent considérablement le contact intime entre la phase liquide et la phase gazeuse, il en découle un grand coefficient volumique de transfert de masse et une grande vitesse de transfert de chaleur.

Ces caractéristiques sont désirables pour l'utilisation de l'absorbeur à contact turbulent dans les opérations d'absorption ou d'épuration, dans l'élimination des polluants gazeux rejetés dans l'atmosphère, dans le refroidissement des eaux des centrales thermiques, dans la déshumidification des gaz saturés ou dans les épurations pour récupérer les fines particules.

Le coefficient global de transfert de matière et la hauteur de l'unité de transfert de masse, sont les paramètres principaux étudiés pour rendre compte de l'efficacité du transfert de masse.

Certains auteurs ont également utilisé la notion d'efficacité de la colonne, ou encore les concentrations des absorbats dans les effluents, et les premières études ont été menées dans ce sens.

D'autres études ont été également menées pour caractériser les mécanismes intrinsèques du transfert de masse, et ont porté sur les résistances au transfert de masse coté liquide et coté gaz.

Dans cette partie (II.2) nous passons en revue les différents résultats expérimentaux des différents auteurs relatifs au coefficient global de transfert de matière (K_g), au coefficient local de transfert de matière coté liquide (k_l), coté gaz (k_g), et à l'aire interfaciale (a).

II.2.1. Revue bibliographique sur le coefficient global de transfert de matière

a) Résultats de W.J.M. Douglas et col. [14].

W.J.M. Douglas étudia l'absorption de l'ammoniac (NH_3) dilué dans l'air par des solutions d'acide borique.

La hauteur de l'unité de transfert de masse globale, exprimée par rapport à la hauteur statique, fût trouvée égale à la moitié ou au tiers de celle nécessaire dans une colonne à garnissage conventionnelle.

L'auteur souligne également que la hauteur de l'unité de transfert augmentait avec le débit du gaz, qu'elle diminuait avec l'augmentation du débit liquide et qu'elle augmentait avec la hauteur statique du garnissage.

L'auteur définissa le coefficient volumique global de transfert de masse par rapport à la hauteur statique, à cause de l'incertitude sur la hauteur dynamique:

$$K_g \cdot a_{st} = \frac{G M_g}{H_{0g} P} \quad (\text{II. 20})$$

où:

H_{0g} est la hauteur de l'unité de transfert, définit telle que:

$$H_{0g} = \frac{H_{st}}{N_{0g}} \quad (\text{II. 21})$$

et:

N_{0g} est le nombre d'unités de transfert définit tel que:

$$N_{0g} = \frac{(y_1 - y_2)}{(y - y^*)_{ml}} \quad (\text{II. 22})$$

avec:

$(y - y^*)_{ml}$, la moyenne logarithmique du potentiel de transfert,

y_1 , y_2 et y^* respectivement les fractions molaires dans la phase gazeuse à l'entrée et à la sortie de la colonne à l'équilibre.

b) Résultats de Blyakher et col.[8]

Les auteurs mesurèrent l'efficacité d'absorption dans le cas de l'absorption physique du dioxyde de soufre (SO_2) et de l'ammoniac (NH_3) dans l'eau.

Les résultats montrent l'existence d'un régime optimal pour un débit liquide compris entre 0,010 et 0,015 m/s et un débit de gaz de l'ordre de 1,5 m/s.

On observe un maximum d'efficacité par rapport à la vitesse superficielle de gaz entre 1,5 et 2 m/s.

c) Résultats de I.P. Levsh et col. [45]

Les auteurs mesurèrent le coefficient volumique global de transfert de masse ($K_g a_d$) rapporté à la hauteur dynamique du lit, dans le cas de la désorption de l'oxygène à partir de l'eau.

Les auteurs notent que le coefficient volumique global de transfert de masse $K_g a_d$ augmentait avec le débit d'arrosage liquide et diminuait lorsque la vitesse superficielle du gaz et la hauteur statique du garnissage augmentaient.

Quand la vitesse superficielle du gaz U_g augmente, l'aire interfaciale a_d diminue, il s'ensuit que $K_g a_d$ diminue, alors que $K_g a_{st}$ devait avoir une allure contraire.

d) Résultats de Epstein et col. [16]

Les auteurs étudièrent l'adsorption du dioxyde de soufre SO_2 par des solutions alcalines dans un épurateur à l'échelle pilote. L'efficacité de séparation du gaz fut trouvée considérablement plus grande dans l'absorbteur à contact turbulent en comparaison avec les colonnes à lit fixe et les épurateurs à venturi.

e) Résultats de Barile et col. [5]

Les auteurs étudièrent les performances du contacteur à lit turbulent en tant que tour de refroidissement des gaz chauds par l'eau.

L'étude de la hauteur de l'unité de transfert en fonction des différentes variables opératrices a mené les auteurs aux conclusions suivantes:

- le coefficient global de transfert de masse ($K_g a_{st}$) diminuait lorsque la hauteur statique du garnissage H_{st} diminuait, le rapport massique de l'arrosage liquide par rapport au flux du gaz (L/G) et le diamètre des sphères du garnissage (d_p) restant constant.

- le coefficient global de transfert de masse ($K_g a_{st}$) augmentait quand le débit liquide (L) et gazeux (G) augmentaient.

En supposant une dépendance fonctionnelle du coefficient global de transfert de masse avec les variables adimensionnelles Re_p (nombre de Reynolds pour le solide), et Fr_l (nombre de Froude pour le liquide) et en se basant sur les performances du refroidissement, les auteurs déduisirent la corrélation suivante pour le système air/eau:

$$\frac{M_A P K_g a_{st} H_{st}}{L} = 0,0819 Re_p^{-0,028} Fr\eta^{-0,169} \quad (\text{II. 23})$$

avec:

$$Re_p = \frac{d_p L}{\mu_l} ; Fr\eta = \frac{L^2}{gd_p \rho_l}$$

Les auteurs étudièrent les caractéristiques de transfert de masse d'une unité pilote de purification du gaz de phénol en utilisant une solution de soude (NaOH) à 15%. La capacité de transfert de masse a été estimée par le nombre d'unités de transfert dans la phase gazeuse N_{0g} défini comme suit:

$$N_{0g} = \frac{1}{n} \ln \frac{y_n}{y_k} \quad (\text{II. 24})$$

où:

- y_n et y_k sont respectivement les concentrations en phénol à l'entrée et à la sortie de l'épurateur,

- n étant le nombre d'étages.

L'efficacité de la section d'épuration augmente quelque peu avec la vitesse superficielle du gaz (U_g) et celle du liquide (U_l), et augmente de façon appréciable avec la hauteur statique du garnissage H_{st} .

La capacité de transfert de masse augmente lorsque le pourcentage de vide de la grille support et la masse volumique des particules de garnissage augmentent.

La corrélation suivante fut proposée par les auteurs

$$N_{0g} = 5.73.10^{-2} H_{st}^{0,39} \rho_p^{0,3} \varphi^{-0,64} \quad (\text{II. 25})$$

g) Résultats de A. Miconnet et col. [48]

Les auteurs étudièrent les performances de l'absorbant à contact turbulent dans une unité semi-pilote avec pour objectif de trouver des résultats pour un système gaz-liquide ayant un intérêt industriel: HCl / eau.

Ils déterminèrent l'efficacité de l'absorption (h) du gaz HCl dans l'eau définie comme suit:

$$h = (Q_e - Q_s) / Q_e \quad (\text{II. 26})$$

où:

Q_e et Q_s sont respectivement les débits de HCl en m^3/s à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur.

Les conclusions de cette étude font apparaître que l'efficacité est favorisée avec l'augmentation de la vitesse superficielle du liquide (U_l), celle du gaz (U_g) restant constante.

Les conditions expérimentales, et les méthodes utilisées pour la détermination du coefficient global de transfert de matière, sont résumées dans le tableau 8.

II.2.2. coefficient local de transfert de masse côté liquide (K_{1a}).

Il existe relativement peu de travaux sur l'estimation du coefficient local de transfert de masse K_{1a} .

Nous citons ceux d'Elenkov et Kossev, [15] qui utilisèrent des sphères creuses de polystyrène et des sphères d'un mélange de colophane-paraffine pour la désorption de l'oxygène à partir d'un courant d'eau saturée.

Les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7: Conditions expérimentales pour la détermination de (K_{1a})

| Tableau Garnissage | | | | Système employé | Hst [mm] | ϕ [-] | Débit liquide [$m^3/m^2 \cdot s$] | Débit gaz [$m^3/m^2 \cdot s$] | |
|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|----------|------------|-------------------------------------|---------------------------------|------|
| Polystyrène | | Colophane-paraffine | | | | | | | |
| dp [mm] | ρ_p [Kg/m^3] | dp [mm] | ρ_p [Kg/m^3] | | | | | | |
| 18 | 167 | 17 | 1030 | O ₂ -air/eau | 170 | 0,15 | 0,0056 | 1,94 | |
| | | | | | | | 0,60 | à | à |
| 17 | 930 | | | | | 200 | 0,79 | 0,022 | 5,54 |

Les auteurs mesurèrent le coefficient de transfert de masse volumique du film (K_{1A}) rapporté à l'unité d'aire de la section droite de la colonne. Notons que:

$$K_{1A} = K_{1a_{st}} H_{st} \quad (\text{II. 27})$$

A étant l'aire interfaciale par unité d'aire de la section droite de la colonne.

Tableau 7: Conditions opératoires et méthodes de détermination du coefficient global de transfert de matière des différents auteurs

| Auteurs | Système triphasique étudié | | | Conditions opératoires | | | | | | Méthode utilisée |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------|---------------|----------------|-----------------|--|
| | Liquide | Gaz | Solide | d_p (mm) | ρ_p (Kg/m ³) | Hst (mm) | D_c (mm) | U_g (m/s) | U_l (cm/s) | |
| W.J.M DOUGLAS [14] | Acide borique | NH ₃ /air | Sphères creuses de Polyéthylène | 38 | 537 | 260-838 | — | 1,17÷2,25 | 0,619÷20,3 | Absorption chimique de NH ₃ par des solutions d'acide borique. |
| BLYAKHER et col. [8] | Eau | NH ₃ /SO ₂ | Sphères creuses de Polyéthylène | 88 | 180 90 | 600 1800 | 200 | 2,0÷2,4 | 0,014+1,1 | Absorption physique de SO ₂ et NH ₃ dans l'eau. |
| EVSH et col. [45] | Eau | O ₂ | Parallélépipèdes en plastiques | 18x9x2 8x4x0,3 | — | 70:210 | 178 | 2÷5 | 0,2+1,7 | Désorption de l'Oxygène à partir de l'eau. |
| BARILE et col. [6] | Eau | Air | Sphères creuses de Polypropylène | — | — | 91,4+387 | — | 1,44+4,32 | 0,34+1,06 | Refroidissement de l'air chaud par l'eau. |
| GEL'PERIN et col. [20] | Solution NaOH | Gaz de phénol | Sphères creuses de Polyéthylène | 30 | 200-500 | 100-300 | 700 | — | 0,27+1,66 | Absorption chimique des gaz de phénol par une solution de NaOH |
| MICONNET et col. [48] | Eau | HCl | Polyéthylène | 20 38 | 86,6 254 | — | 300 | 1÷6 (*) | 1÷7,5 | Absorption physique de HCl par l'eau. |

(*) Flux massique en Kg /m².s

Ils reportèrent que le coefficient volumique local de transfert de masse local (K_{lA}) augmentait avec l'accroissement de la vitesse superficielle du gaz (U_g) et de la hauteur statique du garnissage H_{st} .

Les auteurs proposèrent une corrélation pour estimer le coefficient de transfert local K_{lA} :

$$\frac{K_{lA}}{U_l} = 0,024 \frac{D_l}{h_0 U_l} (h_0 U_l \rho_l)^{0,1} \left[\frac{h_0 U_g \rho_g}{\mu_g} \right]^{1,5} \left[\frac{\mu_l}{\rho_l D_l} \right]^{0,5} \quad (\text{II. 28})$$

où:

h_0 est la hauteur de la colonne de liquide, ou hauteur équivalente à la chute de pression à travers le lit, et D_l étant le coefficient de diffusion molaire du liquide.

II.2.3. Coefficient local de transfert de masse dans la phase gazeuse

a) Résultats de Douglas et col. [13]

Les auteurs étudièrent le coefficient volumique local de transfert de matière côté gaz (k_{gast}) et reportèrent que le coefficient était deux fois plus grand dans l'absorbeur à contact turbulent que dans les colonnes à garnissage conventionnelles, et était de l'ordre de 47,75 à 165,20 $\text{Kmoles.s}^{-1}.\text{m}^3.\text{atm}^{-1}$.

b) Résultats d'Elenkov et Kossev [15]

Les auteurs utilisèrent l'évaporation de l'eau pour mesurer le coefficient local de transfert de masse $k_{cg}.A$ défini en terme de différences de concentrations dans la phase gazeuse comme force motrice au lieu des pressions partielles.

Les auteurs trouverent que le coefficient ($k_{cg}.A$) augmentait de manière significative avec la vitesse superficielle du gaz (U_g) et plus modérément avec la vitesse superficielle du liquide (U_l) et la hauteur statique du garnissage (H_{st}). Ils trouvèrent également que le coefficient ($k_{cg}.A$) diminuait avec l'augmentation de la fraction de vide de la grille support.

La corrélation suivante a été proposée:

$$\frac{k_{cg}A_{ho}}{D_g} = 0,11 \frac{U_{gho} \rho_g}{\mu_{gl}} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{0,5} \left[\frac{g h o^3 \cdot \rho_g^2}{\mu_g^2} \right]^{0,1} \quad (\text{II. 29})$$

Les conditions expérimentales et les méthodes utilisées pour la détermination du coefficient local de transfert de masse côté gaz, par les différents auteurs, sont résumées sur le tableau 9.

II.2.4. L'aire interfaciale

a) Résultats de Kossev et col. [36]

Les auteurs étudièrent les variations de l'aire interfaciale pour de grands débits de gaz.

Ils trouvèrent que l'aire interfaciale rapportée au volume du lit dilaté (a_d) augmente avec l'accroissement de la vitesse superficielle du gaz (U_g) et celle du liquide et diminue par la suite. Ils rapportèrent également que l'aire interfaciale (a_l) diminuait de manière très rapide lorsque la vitesse superficielle du gaz (U_g) atteignit 2,85 m/s.

a) Résultats de Gel perin et col. [22]

Les auteurs proposèrent une corrélation pour l'aire interfaciale en fonction de la hauteur statique du garnissage (H_{st}) de la fraction de vide de la grille (f) et des vitesses superficielle du gaz et du liquide:

$$a_{st} = \left[\frac{1,685 \cdot 10^5}{a_b^{1,55} U_g^{0,29}} \right]^{1000 H_{st}} \quad (\text{II. 30})$$

avec:

$$a_b = 58,7 U_l^{0,44} U_{g0}^{0,92} \quad (\text{II. 31})$$

et

$$U_{g0} = U_g / f \quad (\text{II. 32})$$

Tableau 9: Conditions opératoires et méthodes de détermination du coefficient local de transfert de matière côté gaz des différents auteurs

| Auteurs | Système triphasique étudié | | | Conditions opératoires | | | | | | Méthode utilisée |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--|------------------------|----------------------------------|-------------|---------------|----------------|-----------------|--|
| | Liquide | Gaz | Solide | d_p (mm) | ρ_p (Kg/m ³) | Hst (mm) | D_c (mm) | U_g (m/s) | U_l (cm/s) | |
| DOUGLAS et Col. [14] | Solution NaOH | SO ₂ / air | Sphères creuses de Polyéthylène | 38 | — | 396 | — | 4,72÷4,98 | 2,09÷3,40 | Absorption chimique de SO ₂ dilué dans l'air par une solution de NaOH |
| ELENKOV et KOSSEV [15] | Eau | Vapeur d'eau | Polystyrène | 18 17 | 167 930 | 170 200 | — | 1,94÷5,54 | 0,56÷2,22 | Evaporation de l'air |
| WOZNIACK et OSTERGAARD [11] | Solution NaOH | CO ₂ / air | Sphères creuses de Polypropylène | 9,7 | 388 | 220 | 100 | 0,7 | 0,2÷0,7 | Absorption chimique de CO ₂ dilué dans l'air par une solution de NaOH |

c) Résultats de Wozniak et Ostergaard [71]

Les auteurs étudièrent l'effet de la vitesse superficielle du liquide (U_l) à un débit de gaz constant, et rapportèrent que l'aire interfaciale (a_l) avait tendance à diminuer pour de faibles vitesses de gaz ($U_g < 0,7$ m/s). Ceci est probablement, dû à une fluidisation imparfaite.

d) Résultats de Wozniak [72]

L'auteur remarque que l'aire interfaciale (a_l) était constante avec l'augmentation de la vitesse superficielle du liquide (U_l) pour une valeur de U_g de 1,7m/s; mais décroissait quand la vitesse du gaz atteignit des valeurs de l'ordre de 2,5 à 3,0 m/s. La corrélation suivante fut proposée:

$$\frac{a_{st}}{a_p} = 6,18710 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\epsilon_g}{1 - \epsilon_g} \right)^{0,8022} \left(\frac{H_d \Delta P}{U_g \mu_g} \right)^{0,9337} \quad (\text{II } 33)$$

où:

a_p est l'aire de la surface géométrique des particules par unité de volume de lit statique.

g) Résultats de Tabei et col. [57]

Les conclusions de cette méthode sont:

-L'aire interfaciale (a_d) augmente avec l'accroissement de la vitesse superficielle du gaz et liquide et devient maximale pour une rétention de gaz (ϵ_g) de l'ordre de 0,6.

-Une corrélation simple, valable pour un large domaine de variation des conditions opératoire est donnée:

$$\frac{a_l}{\epsilon_l} = 2100 \left(\frac{\epsilon_g}{\epsilon_l} \right)^{1,25} \quad (\text{II } 34)$$

$$a_d = 2100 \epsilon_g^{1,25} \epsilon_l^{0,75} \quad (\text{II } 35)$$

Les conditions expérimentales et les méthodes utilisées par les différents auteurs pour la détermination de l'aire interfaciale sont résumées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Conditions opératoires pour la détermination de l'aire interfaciale.

| Auteurs | Systèmes triphasiques étudiés | | | Conditions opératoires | | | | | | Méthode utilisée |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|---|------------------------|----------------------------------|------------------|---------------|----------------|----------------|--|
| | Liquide | Gaz | Solide | d_p (mm) | ρ_p (Kg/m ³) | H_{st} (mm) | D_c (mm) | U_g (m/s) | U_l (m/s) | |
| WOZNIAK et OSTERGAARD [71] | Solution de NaOH | CO ₂ / air | Sphères creuses de Polypropylène | 9,7 | 388 | 220 | 100 | 0,7 | 2÷6,75 | Absorption chimique de CO ₂ dilué dans l'air par une solution de NaOH |
| KOSSEV et Col. [36] | | | Polystyrène | 18 | 167 | 140 | 90 | 2,87÷4,15 | | |
| WOZNIAK [72] | | | Sphères en Plastique | 19,6 | 260 | 290 | 200 | 1,7÷3,0 | 0,8÷2,7 | |
| KITO et Col. [32] | | | Sphères en Plastique | 11÷28,5 | | 150 | | 0,3÷2,5 | 100 (*) | |
| STRUMILLO et KUDRA [56] | | | | 5÷7,5 10 | 1050 | 80÷160 160 | 185 | 0,5÷3,5 | 1,39÷3,06 | |
| TABELI et Col. [57] | | | | 19,5 | 170 | 50÷100 200 | 102 | 1,4÷2,5 | 1÷2,5 | |

CHAPITRE III

INSTALLATION EXPERIMENTALE. CARACTARISTIQUES ET PROCEDURE EXPERIMENTALE. METHODES DE MESURE.

III.1. Caractéristiques du dispositif expérimental

- III.1.1. Colonne d'étude
- III.1.2. Distributeur de liquide
- III.1.3. Distributeur de gaz
- III.1.4 Grille support de garnissage

III.2. Procédure expérimentale

- III. 1. Conditions opératoires
- III. 2. Procédure Expérimentale

III.3. Méthodes de mesure et calculs

- III. 3. 1. Débit de gaz
- III. 3. 2. Débit de liquide
- III. 3. 3. Pertes de charge
- III. 3. 4. Vitesse minimum de fluidisation
- III. 3. 5. Expansion du lit

III.4. Propriétés des fluides

- III.4.1. Propriétés du gaz
- III.4.1. Propriétés du liquide

III.5. Propriétés du solide

CHAPITRE III

INSTALLATION EXPERIMENTALE. CARACTERISTIQUES ET PROCEDURE EXPERIMENTALE. METHODES DE MESURE.

III.1. Caractéristiques du dispositif expérimental

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'installation expérimentale utilisée ainsi que les méthodes de mesure et procédure expérimentale. Le choix des techniques de mesure s'est porté sur des méthodes offrant une mise en œuvre aisée et une fiabilité remarquable.

L'installation expérimentale a été conçue et réalisée selon les objectifs suivants:

- la mise en œuvre d'un écoulement hydrodynamique établi d'une suspension gaz-liquide-solide, à contre-courant de gaz et de liquide, dans une colonne contenant un garnissage de faible masse volumique;
- l'étude des paramètres hydrodynamiques du lit fluidisé, tels que la perte de charge, la vitesse minimum de fluidisation, l'expansion du lit.

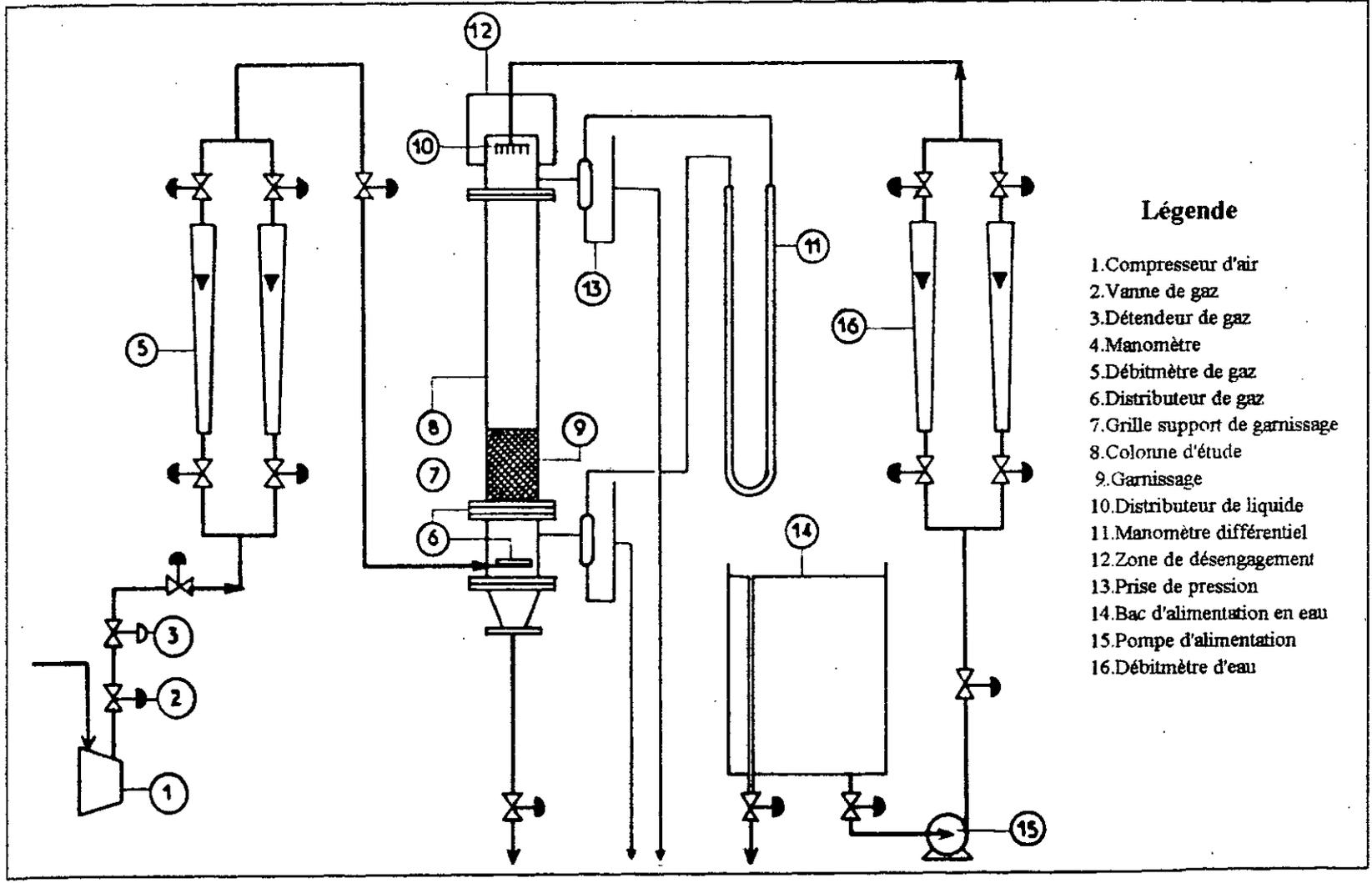
L'appareillage expérimentale doit pouvoir assurer les conditions de fonctionnement suivantes:

- assurer une distribution uniforme du gaz à travers la section du lit mobile;
- assurer une distribution uniforme du liquide, sous forme de gouttelettes, au dessus du lit mobile, à travers toute la section de la colonne;
- assurer la constance des propriétés physiques pour le système gaz-liquide-solide étudié.

Le schéma général de l'installation expérimentale est présenté sur la figure (12).

L'installation expérimentale fonctionnant à contre-courant de gaz et de liquide, est constituée essentiellement d'une colonne (8) en plexiglas transparent, d'un diamètre intérieur de 120 mm et d'une hauteur de 1110 mm.

L'air ambiant provenant d'un compresseur à piston (1) passe à travers un détendeur (3) avant d'être injecté dans le système de distribution de gaz (6) situé en bas de la section de fluidisation et assurant un profil de vitesse plat à l'entrée du lit mobile.



Légende

- 1. Compresseur d'air
- 2. Vanne de gaz
- 3. Détendeur de gaz
- 4. Manomètre
- 5. Débitmètre de gaz
- 6. Distributeur de gaz
- 7. Grille support de garnissage
- 8. Colonne d'étude
- 9. Garnissage
- 10. Distributeur de liquide
- 11. Manomètre différentiel
- 12. Zone de désengagement
- 13. Prise de pression
- 14. Bac d'alimentation en eau
- 15. Pompe d'alimentation
- 16. Débitmètre d'eau

Figure 12: Schéma général de l'installation expérimentale.

Le liquide provenant d'un bac d'alimentation (14) est refoulé par une pompe centrifuge (15) vers le distributeur de liquide (10) placé au sommet du lit et assurant un arrosage liquide uniforme sur l'ensemble de la section du lit mobile.

Le lit de particules (9) est constitué de sphères creuses en polypropylène. Le garnissage solide repose à l'état statique sur une grille (7) fixée à l'entrée de la section de fluidisation.

Lors des expériences, les flux de gaz et de liquide ont été mesurés à l'aide de débitmètres à flotteurs, (5) et (16), préalablement étalonnés.

III.1.1. Colonne d'étude

La colonne d'étude (figure 13) se compose de quatre parties principales:

- la section de lit fluidisé;
- la section de désengagement;
- la section de distribution de liquide;
- la section de distribution de gaz.

La colonne est en plexiglas transparent d'épaisseur 4 mm et de diamètre intérieur 120 mm

Le choix de ce diamètre est le résultat des contraintes suivantes:

- le rapport entre le diamètre du garnissage (d_p) et celui de la colonne (D_c) doit être supérieur à 10÷11, ($D_c/d_p > 10÷11$), pour éviter les effets de paroi qui ont pour conséquence la formation d'une monocouche statique sur les parois de la colonne;
- le garnissage habituellement utilisé pour ce type de procédé, doit avoir un diamètre dans l'intervalle 10 à 40 mm.

La section de lit fluidisé est d'une hauteur de 615 mm, ce qui permet d'atteindre des expansions de lit fluidisé (H_d/H_{st}) de l'ordre de 5 à 10 pour une hauteur statique de garnissage variant de 60 à 120 mm.

La section de désengagement est constituée d'une chambre de 300 mm de hauteur, de section carrée de 210 mm de côté, réalisée en plexiglas transparent de 6 mm d'épaisseur. La colonne est insérée d'une hauteur de 105 mm dans la chambre de désengagement.

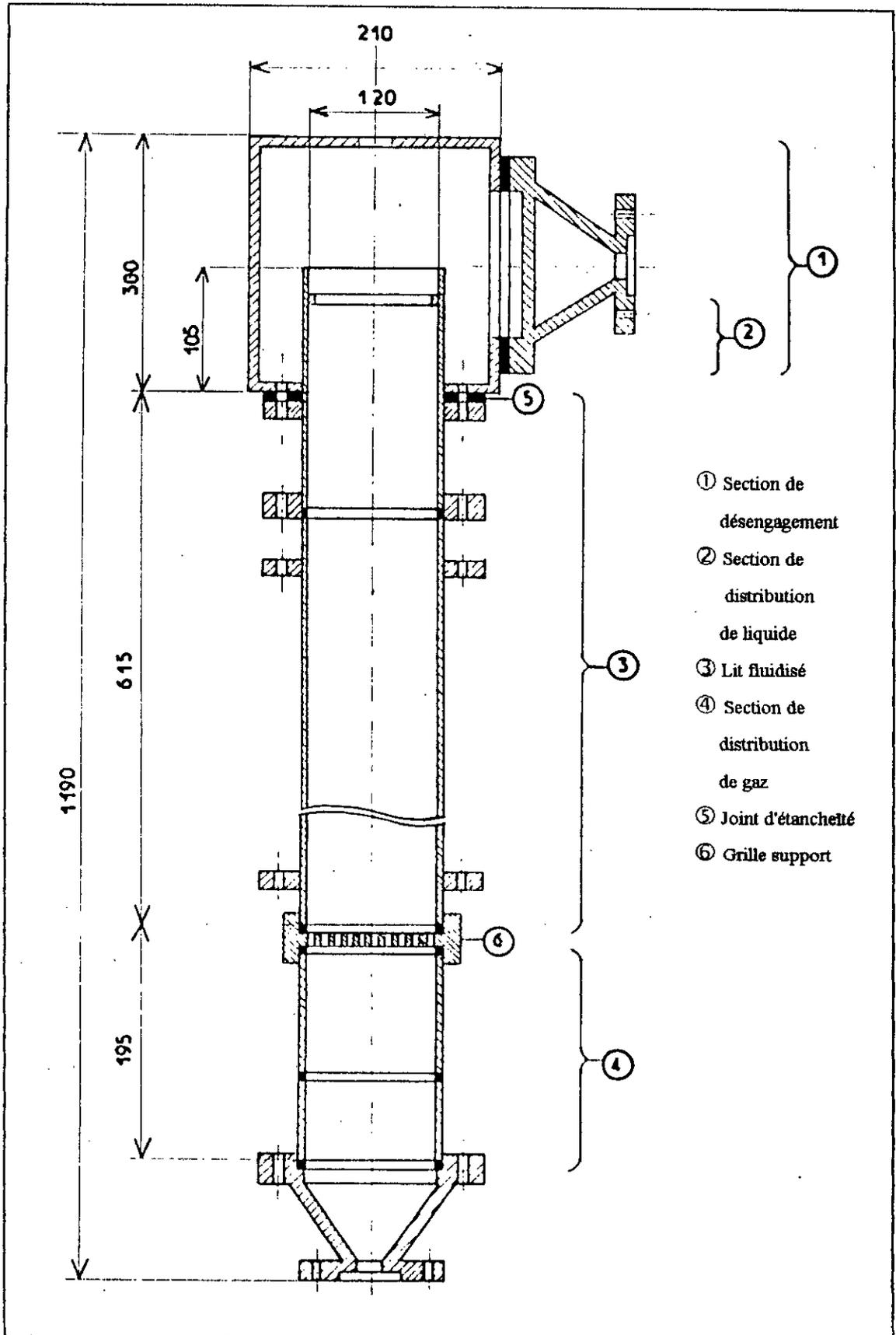


Figure 13 : Colonne d'étude.

III.1.2. Distributeur de liquide.

Le distributeur du liquide est composé d'un dispositif de répartition de l'alimentation liquide; et d' un dispositif d'arrosage (figures 14 et 15). Il a été conçu selon les objectifs suivants:

- assurer un arrosage liquide homogène à travers toute la section du lit fluidisé;
- maintenir l'arrosage homogène quelque soit le débit d'alimentation liquide.

Le dispositif d'arrosage consiste en huit tubes parallèles en cuivre de diamètre 8 mm. avec cinquante tubes latéraux dirigeant le courant liquide vers le bas. Les tubes verticaux ont une longueur de 20 mm et un diamètre intérieur de 3 mm.

L'alimentation en liquide des tubes parallèles se fait en deux points sur les tubes. Cette construction assure pratiquement la même perte de charge à travers les tubes latéraux et donc le même débit d'écoulement à travers chaque tube vertical.

La fixation des tubes verticaux sur chaque tube latéral, a été réalisée de telle manière à assurer une charge liquide constante. ce qui permet un même débit d'écoulement liquide à travers chaque tube vertical.

Le dispositif de répartition de l'alimentation liquide, consiste en un collecteur de diamètre 15 mm, sur lequel sont fixés à une même hauteur huit tubes horizontaux de diamètre intérieur 6 mm, assurant une répartition égale de l'eau pour les tubes latéraux du dispositif d'arrosage.

III.1.3. Distributeur de gaz.

Le dispositif de distribution de gaz (Figure 16) consiste en un tube annulaire de 6 mm de diamètre intérieur et percé d'orifices de 1 mm de diamètre.

Le gaz est introduit dans le tube annulaire à l'aide de trois entrées situées à égale distance l'une de l'autre. Cette construction assure la même perte de charge à travers le tube annulaire ce qui permet d'avoir le même débit de gaz à travers les orifices.

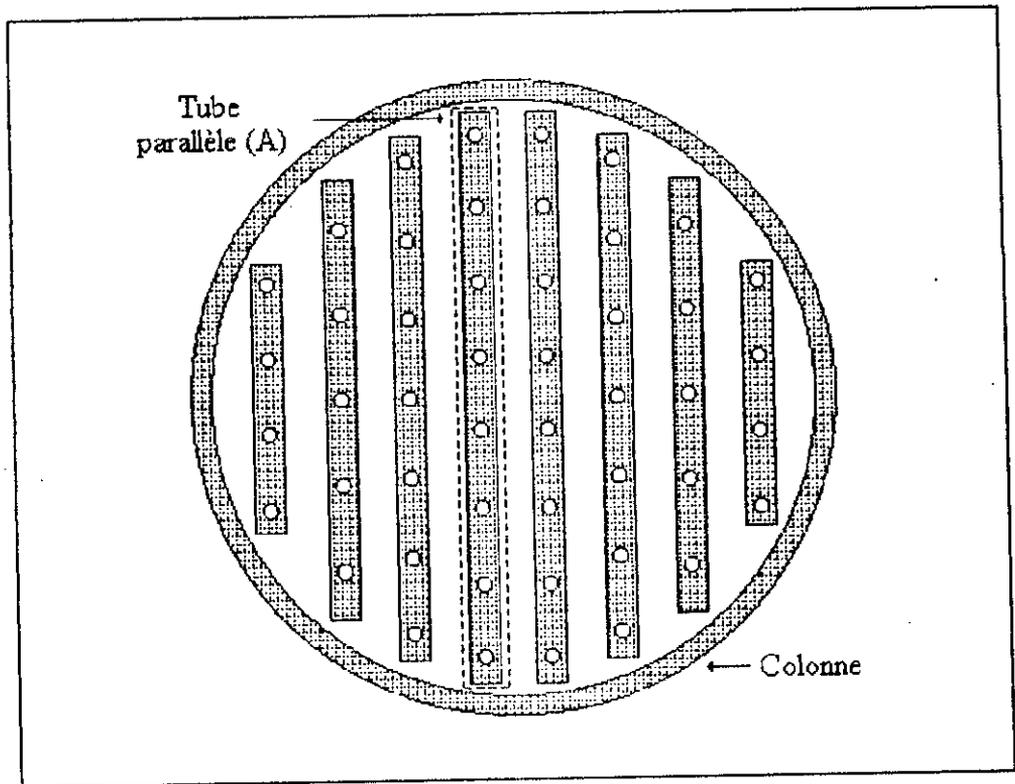


Figure 14: Disposition des tubes verticaux du distributeur de liquide.

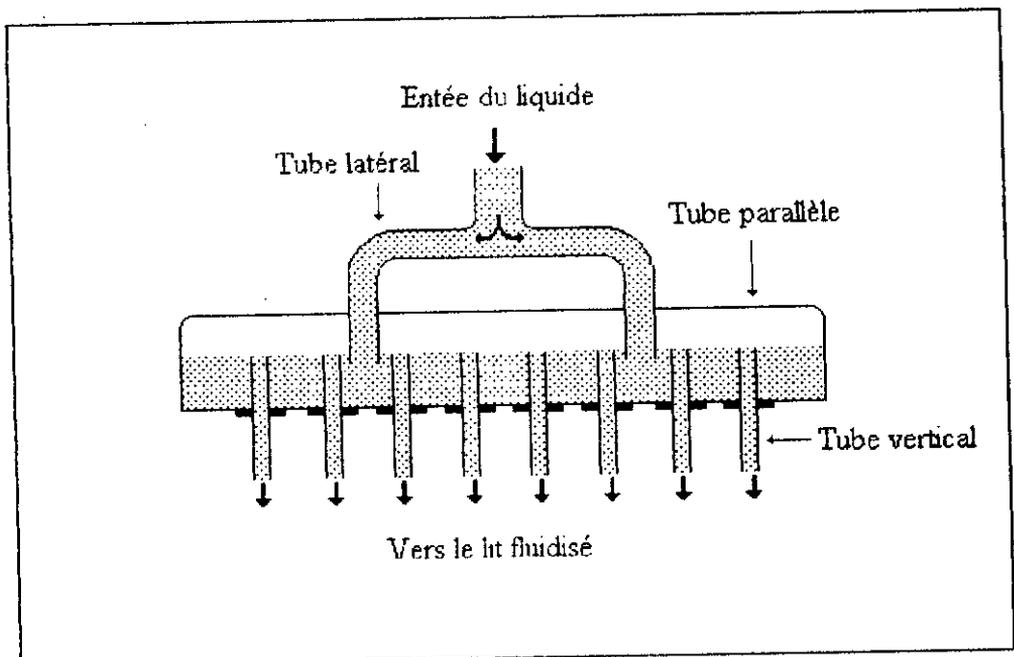


Figure 15: Coupe d'un tube parallèle (A) du distributeur de liquide.

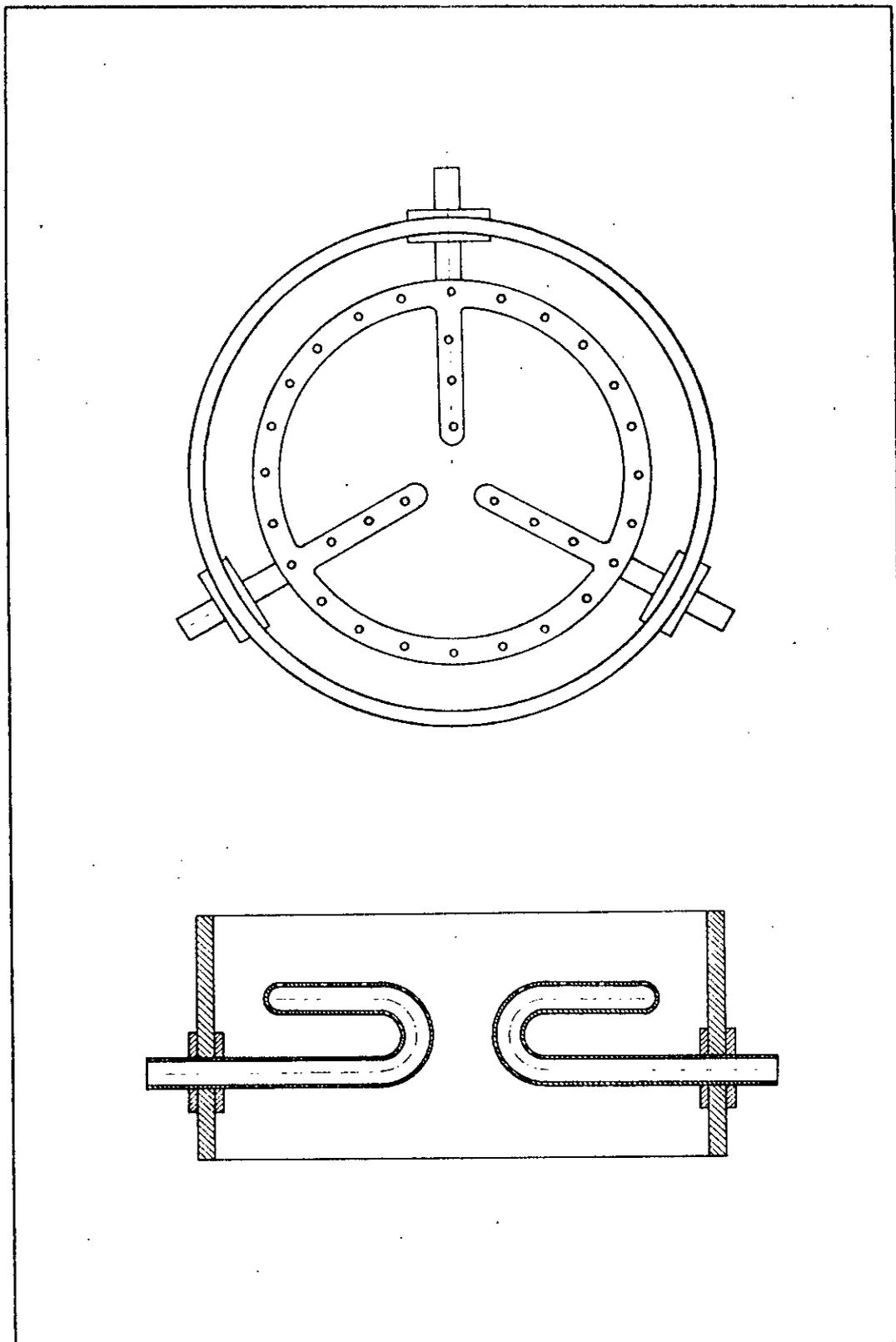


Figure 16 . Distributeur de gaz.

III.1.4. Grille support de garnissage.

Trois grilles support ont été réalisées avec des pourcentages d'ouverture de 32 , 56 et 82%. Les ouvertures de ces grilles, ont été réalisées sous formes d'encoches longitudinales (figure 17) dont l'épaisseur varie suivant le pourcentage de vide.

L'ouverture sous forme d'encoche s'est avérée la plus adéquate pour permettre l'écoulement du liquide notamment aux grands débit de gaz et de liquide.

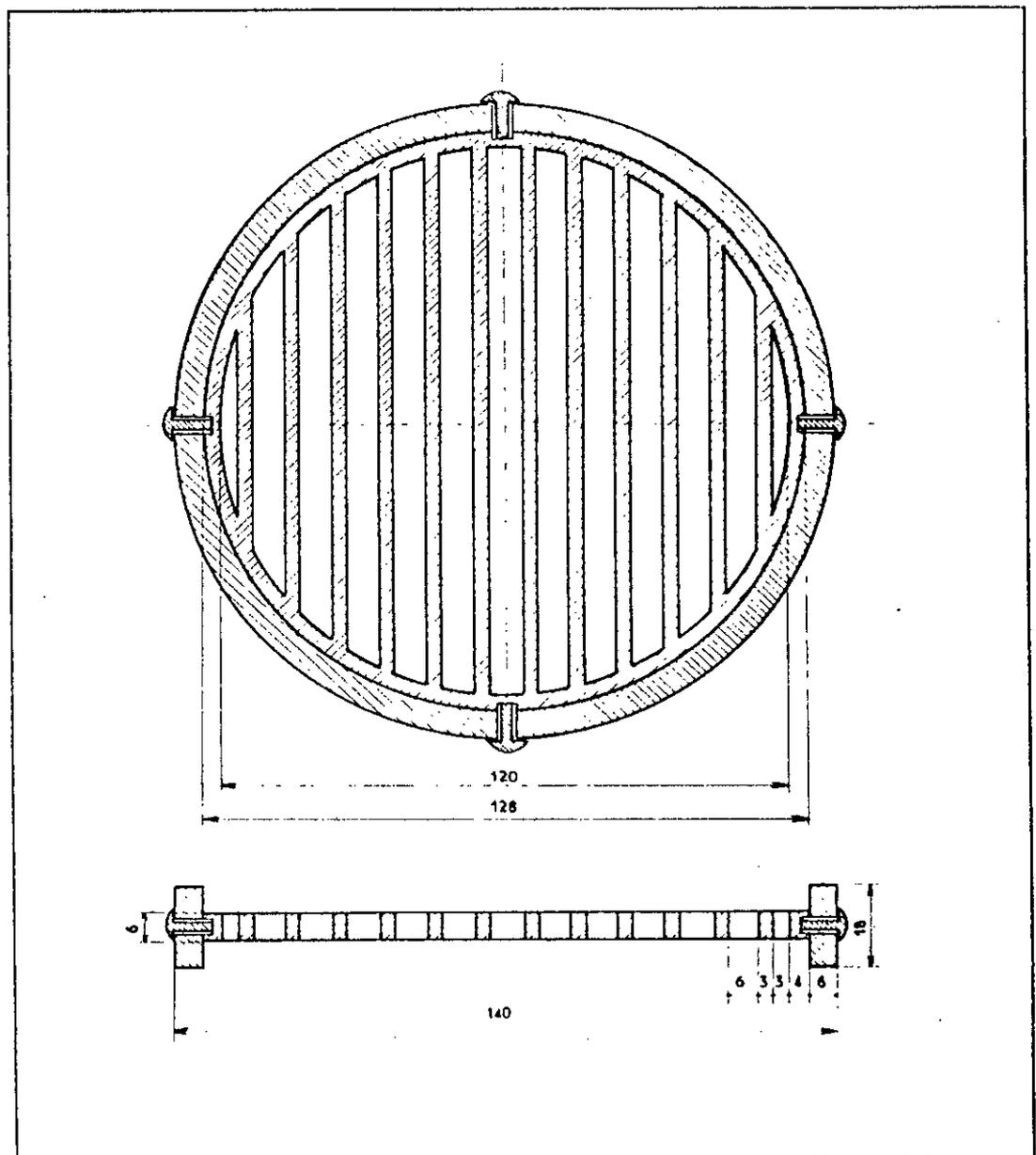


Figure 17 Grille support de garnissage.

III.2. Procédure expérimentale.

II.2.1. Conditions opératoires

Deux types de garnissage ont été étudiés. Pour chaque type de particule, on a fait varier la hauteur statique. De même, pour une hauteur statique fixée, on a fait varier l'ouverture de la grille support de garnissage.

Pour chaque système expérimental ainsi formé et défini par ρ_p , d_p (respectivement la masse volumique et le diamètre du garnissage), H_{st} (hauteur statique du garnissage), ϕ (rapport entre la section libre et la section totale de la grille support), on a fait varier les flux de gaz et de liquide (G [$\text{Kg}/\text{m}^2.\text{s}$] et L [$\text{Kg}/\text{m}^2.\text{s}$]).

Les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau

Tableau 10 : Conditions expérimentales.

| Garnissage | Hauteur statique H_{st} : [mm] | % d'aire libre de la grille (ϕ) | Flux liquide (L) [$\text{Kg}/\text{m}^2.\text{s}$] | Flux de gaz (G) [$\text{Kg}/\text{m}^2.\text{s}$] |
|---|-------------------------------------|---|---|--|
| (I) $\rho_{p(I)} = 868 \text{ Kg}/\text{m}^3$ $d_{p(I)} = 10 \text{ mm}$ | 60 | 32 | 4,57 ; 10,23 ; 20,94 ; 15,84 ; et 27,90 | 0 ÷ 10 |
| | | 56 | | |
| | | 82 | | |
| | 90 | 32 | | |
| | | 56 | | |
| | | 82 | | |
| (II) $\rho_{p(II)} = 736 \text{ Kg}/\text{m}^3$ $d_{p(II)} = 15 \text{ mm}$ | 60 | 32 | | |
| | | 56 | | |
| | | 82 | | |
| | 90 | 32 | | |
| | | 56 | | |
| | | 82 | | |
| | 120 | 32 | | |
| | | 56 | | |
| | | 82 | | |

II.2.2. Procédure expérimentale

Après le choix et le montage de la grille support à étudier, on introduit le garnissage suivant la hauteur statique désirée. Ensuite on règle le débit liquide à la valeur souhaitée, et

on le maintient constant durant toute la durée de l'opération. On fait varier, alors, le débit de gaz à, l'aide du rotamètre préalablement étalonné, en commençant par la valeur la plus basse, vers les valeurs les plus élevées jusqu'au point d'engorgement.

Les données expérimentales ne sont relevées que lorsque l'état d'équilibre hydrodynamique est atteint (les valeurs restant constantes pendant plus de quinze minutes).

Les mesures à relever sont:

- le flux de gaz à l'entrée de la colonne à l'aide de rotamètres,
- la pression et la température du gaz à l'entrée du rotamètre,
- la perte de charge à travers le lit mobile,
- la hauteur dynamique du lit mobile,
- le flux de liquide.

III.3. Méthodes de mesure et calculs.

III.3.1. Débit de gaz.

Lors de nos expériences, le débit de gaz a été mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur préalablement étalonné à l'aide d'un organe déprimogène "diaphragme " dont les prises de pression sont situées selon la norme "VENA CONTRACTA" (annexe A.1).

III.3.2. Débit de liquide.

Le débit liquide a été mesuré à l'aide d'un débitmètre à flotteur étalonné par mesure du temps nécessaire au remplissage d'un réservoir de volume connu (annexe A.2).

III.3.3. Pertes de charge.

Les pertes de charge à travers le lit fluidisé ont été mesurées à l'aide d'un manomètre différentiel à tubes en "U" remplis d'eau. Les deux extrémités du tube en "U" sont reliées à l'aide d'un flexible en plastique souple aux deux prises de pression placées

immédiatement au dessous de la grille support et au dessous de la grille du distributeur de liquide.

Afin d'atténuer les fluctuations de pression, un système a été conçu, permettant de séparer l'eau entraînée par le gaz à travers le système de mesure (figure 18).

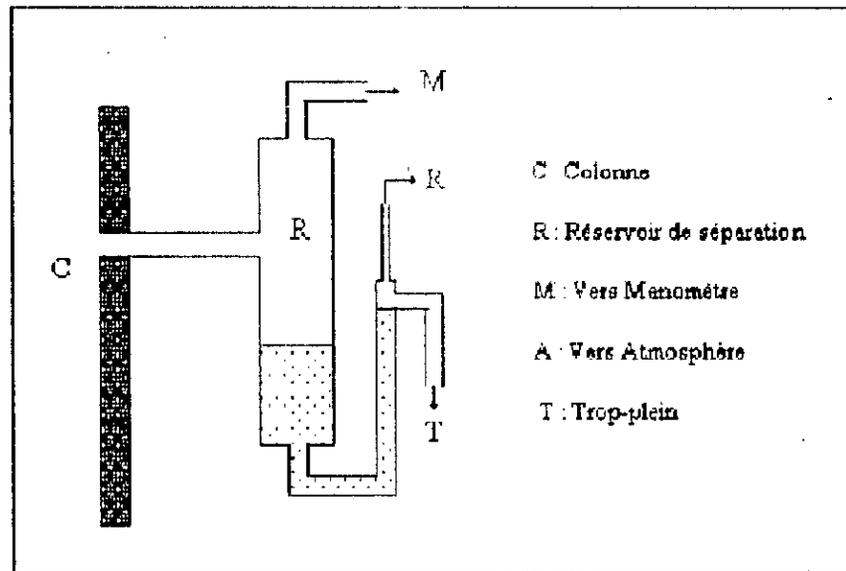


Figure 18: Système de prise de pression

III.3.4. Vitesse minimum de fluidisation.

La technique la plus simple est l'appréciation visuelle, ce qui implique une part d'arbitraire; cette technique permet cependant de distinguer les lits fixes des lits partiellement fluidisés.

Le lit fluidisé est observé, lorsque à un niveau donné de la colonne, les billes bougent les unes par rapport aux autres et changent de voisines.

La technique utilisée est celle qui consiste à considérer la vitesse minimum de fluidisation comme l'intersection des droites caractérisant le lit fixe et le lit fluidisé lors de la représentation des pertes de charge en fonction du flux gazeux (Wild et Col. [70] et Begovitch [7]).

III.3.5. Expansion du lit.

La hauteur du lit triphasé est déterminée par observation visuelle à travers la paroi de la colonne comme étant la limite entre le lit triphasique et la zone de désengorgement où règne un écoulement diphasique gaz- liquide (Danuka [12], Epstein [17]).

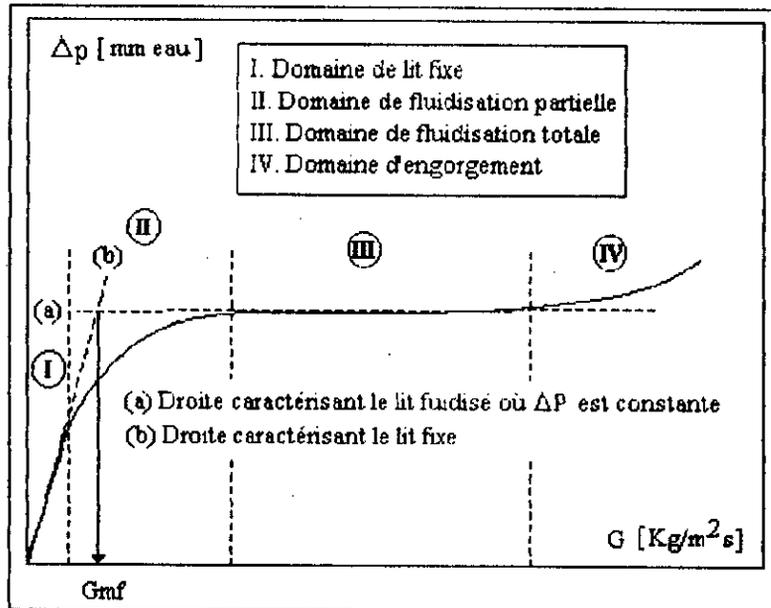


Figure 19 : Détermination de la vitesse minimum de fluidisation

La différence entre le lit triphasique et le lit diphasique est bien nette, ce qui permet une mesure très précise tant que la vitesse de gaz est relativement modérée.

Aux débits de gaz plus élevés, apparaissent des fluctuations dans les hauteurs du lit qui rendent la hauteur plus difficile à déterminer. L'incertitude reste cependant assez modérée (7-8%).

III.4. Propriétés des fluides.

III.4.1. Propriétés du gaz.

Les propriétés physiques de l'air comprimé utilisé sont déterminées à l'aide des mesures locales de pression et de température, et des données standards. La masse volumique du gaz (ρ_g) est déterminée à l'aide de la formule:

$$\rho_g = 3,485.10^{-3} \left(\frac{P}{t_g + 273} \right) \quad (\text{III.1.})$$

où $0 < t_g < 140 \text{ } ^\circ\text{C}$

La viscosité dynamique du gaz (η_g) est déterminée à l'aide de la formule:

$$\eta_g = 1,711.10^{-5} \left(\frac{t_g + 273}{273} \right)^{0,718} \quad (\text{III.2.})$$

III.4.2 Propriétés du liquide.

Les valeurs et formules pour déterminer la densité, la viscosité et la tension superficielle de l'eau ont été tirées de Handbook of Chemistry and Physics:

| Température °C | Densité | Température °C | Viscosité [mN.s.m ⁻²] | Tension superficielle [dyn.cm ⁻¹] |
|-------------------|---------|-------------------|--------------------------------------|--|
| 14 | 0,99924 | 10 | 1,303 | 74,30 |
| 16 | 0,99894 | 15 | 1,037 | 73,62 |
| 18 | 0,99860 | 20 | 1,001 | 72,88 |
| 20 | 0,99820 | | | |

III.5. Propriétés du solide.

Le solide est constitué de deux lots de sphères creuses de polypropylène dont les caractéristiques sont présentées sur le tableau 11.

Tableau 11: Propriétés du garnissage.

| Type de garnissage | Masse volumique ρ_p [Kg/m ³] | Diamètre d_p [mm] |
|----------------------------------|--|------------------------|
| Sphères creuses de polypropylène | 868 | 10 |
| Sphères creuses de polypropylène | 736 | 15 |

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

IV.1. Pertes de charge

IV.1.1. Effet du flux de gaz

IV.1.2. Effet du flux liquide

IV.1.3. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

IV.1.4. Effet de la hauteur statique du garnissage

IV.1.5. Comparaison des résultats expérimentaux

IV.1.6. Estimation de l'expansion du lit

IV.2. Etude l'expansion du lit

IV.2.1. Effet du flux de gaz

IV.2.2. Effet du flux liquide

IV.2.3. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

IV.2.4. Effet de la hauteur statique du garnissage

IV.2.5. Comparaison des résultats expérimentaux

IV.2.6. Estimation de l'expansion du lit

IV.3. Vitesse de fluidisation

IV.3.1. Effet du flux liquide

IV.3.2. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

IV.3.3. Effet de la hauteur statique du garnissage

IV.3.4. Effet des dimensions du garnissage

IV.3.5. Estimation de la vitesse minimum de fluidisation

IV.4. Corrélations des paramètres hydrodynamiques

IV.4.1. Corrélations des pertes de charge

IV.4.2. Corrélation de l'expansion du lit

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

Ce chapitre porte sur la présentation de l'ensemble des résultats expérimentaux relatifs aux mesures des pertes de charge, de la vitesse minimum de fluidisation, ainsi que de l'expansion du lit.

V.1. Pertes de charge

Nous avons déterminé expérimentalement les pertes de charge associées à l'écoulement triphasé gaz-liquide-solide, d'un mélange air/eau circulant à contre-courant à travers un lit constitué d'un garnissage solide.

L'effet du flux gazeux et liquide, de l'aire libre de la grille support de garnissage, de la hauteur statique de garnissage, sur l'évolution des pertes de charge a été étudié.

Les conditions opératoires sont celles résumées sur le tableau 10. Les caractéristiques du garnissage sont données dans le tableau 11.

IV 1 1. Influence du flux gazeux.

L'observation visuelle du lit lorsque le flux gazeux augmente, à débit liquide constant, met en évidence l'existence de quatre états hydrodynamiques, dans le domaine de variation du flux de gaz exploré:

(I) état de lit fixe caractérisé par une hauteur constante du lit: le liquide s'écoule vers le bas à travers le centre du garnissage, tandis que le gaz s'écoule de manière ascendante à travers le lit, et de manière prédominante le long des parois de la colonne. Cet état est caractérisé par un domaine étroit de variation du flux gazeux et par l'augmentation notable des pertes de charge avec l'accroissement du flux gazeux.

(II) le deuxième état (ou état de fluidisation partielle), commence avec le début du mouvement des particules. Cet état est caractérisé par la fluidisation d'une certaine proportion des particules du garnissage, sans mouvement intense, et par l'accroissement des pertes de charge avec le flux gazeux, d'une manière moins accentuée que lors de l'état de lit fixe.

(III) le troisième état est caractérisé par un mouvement intense des phases, et particulièrement des sphères du garnissage, qui se déplacent avec vigueur dans toutes les directions de la colonne. Cet état est caractérisé par un profil de perte de charge pratiquement constant, et par un domaine de variation du flux de gaz plus large que lors des deux états précédents. Il est en outre caractérisé par un brassage intense des phases liquide et gazeuse, donnant naissance à des tourbillons de gaz et de liquide qui s'interpénètrent. Cette rapide interpénétration des tourbillons conduit à la formation de films et courants liquides qui se mélangent intimement avec le courant gazeux. Les courants et films liquides se brisent continuellement et se rompent en des tourbillons plus fins. Le rôle du mouvement intense des sphères du garnissage à grande vitesse et dans toutes les directions de la colonne, consiste à subdiviser les tourbillons de liquide en tourbillons plus petits et de les distribuer sur la longueur et la section du lit, ce qui augmente l'aire interfaciale et le temps de contact entre la phase liquide et la phase gazeuse. Il est évident que cet état hydrodynamique est le plus approprié pour le transfert de matière et de chaleur.

(IV) le quatrième état (engorgement du lit) est caractérisé par une nette augmentation de l'entraînement liquide par le flux gazeux, et par une augmentation rapide et significative des pertes de charge avec le flux gazeux. Le liquide ne pouvant traverser la colonne est refoulé par le courant gazeux en tête de colonne. La limite de l'état d'engorgement dépend essentiellement du débit liquide et de l'aire libre de la grille support de garnissage.

Les résultats expérimentaux présentés sur les figures 20 à 27 représentant la variation des pertes de charge avec le flux gazeux, à débit liquide constant, montrent clairement l'existence de trois domaines bien distincts, de variation des pertes de charge :

a) un domaine où les pertes de charge augmentent avec le flux gazeux. Ce domaine regroupe en fait les états de lit fixe (zone I) et de fluidisation partielle (zone II). On remarque qu'à partir du point "B", sur les figures 24 à 27, représentant la fin du lit fixe et le début de la zone de fluidisation partielle l'accroissement des pertes de charge est moins accentué et leur augmentation est expliquée par la mise en fluidisation successive des couches de garnissage jusqu'au point "C" .

b) un domaine (Zone III) où les pertes de charge demeurent pratiquement constantes avec l'augmentation du flux gazeux, caractérisé par une fluidisation totale des particules du garnissage,

c) un domaine (Zone IV) caractérisé par une augmentation brusque et rapide des pertes de charge due à l'état d'engorgement du lit.

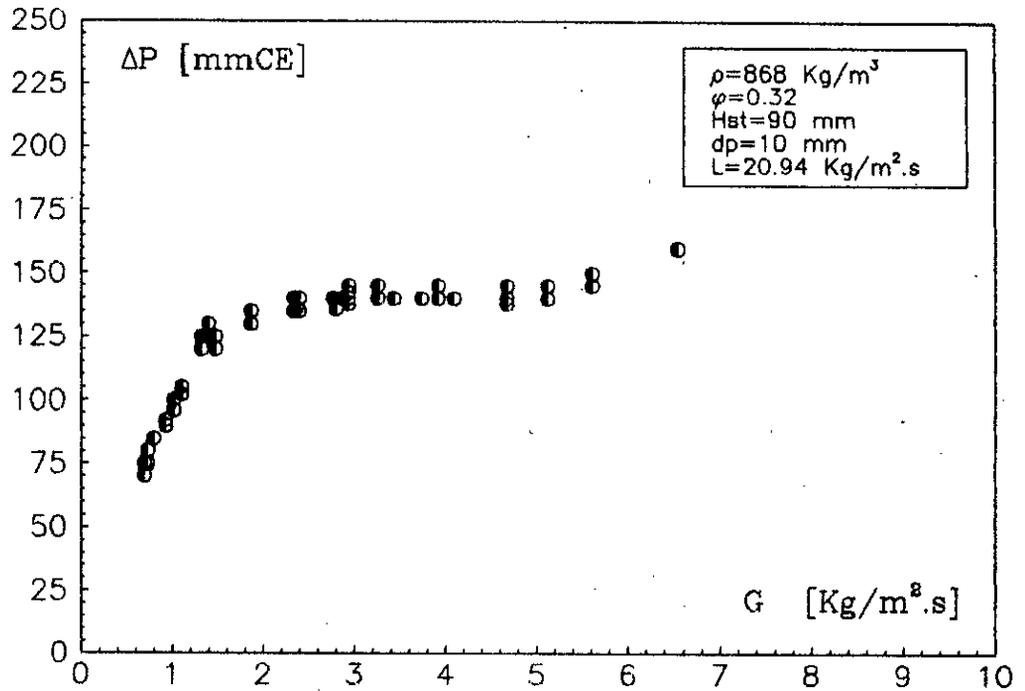


Figure 20 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux

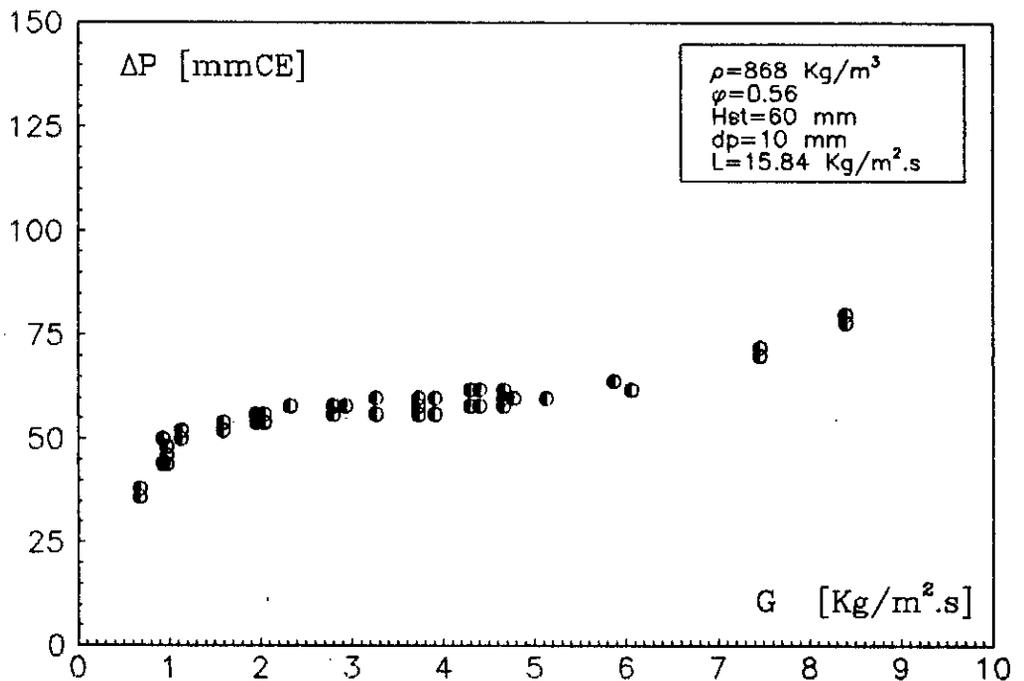


Figure 21 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux

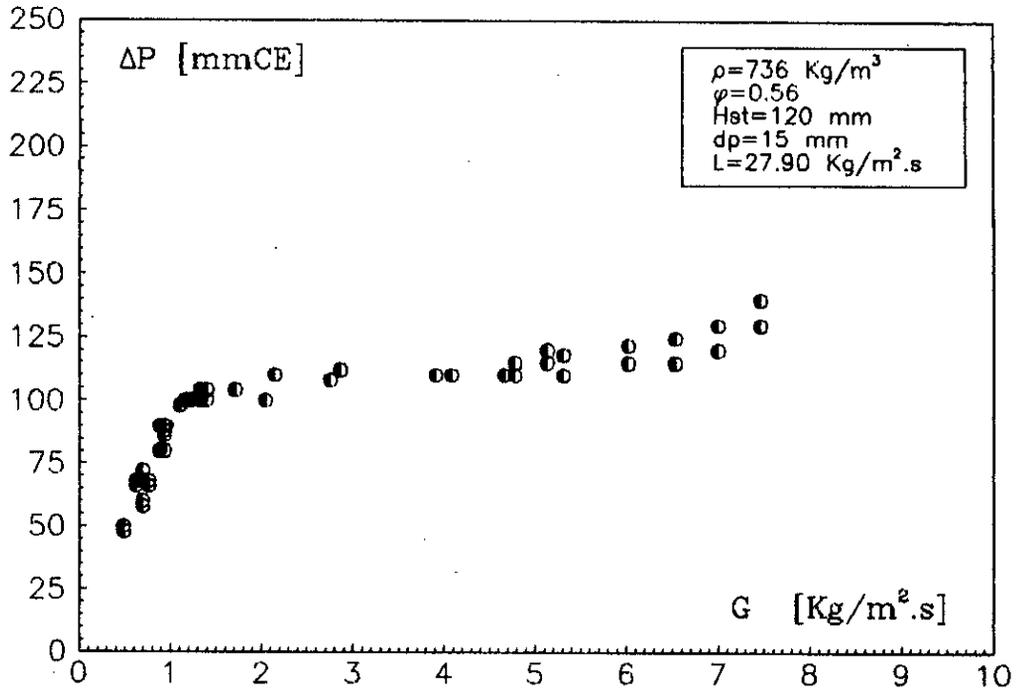


Figure 22 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux

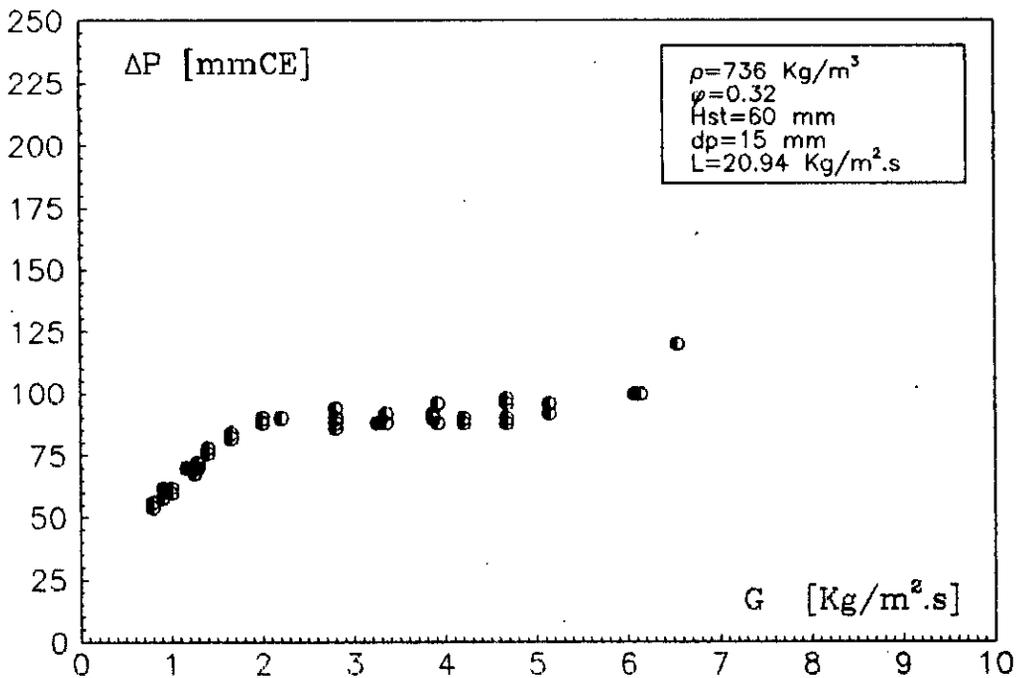


Figure 23 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux

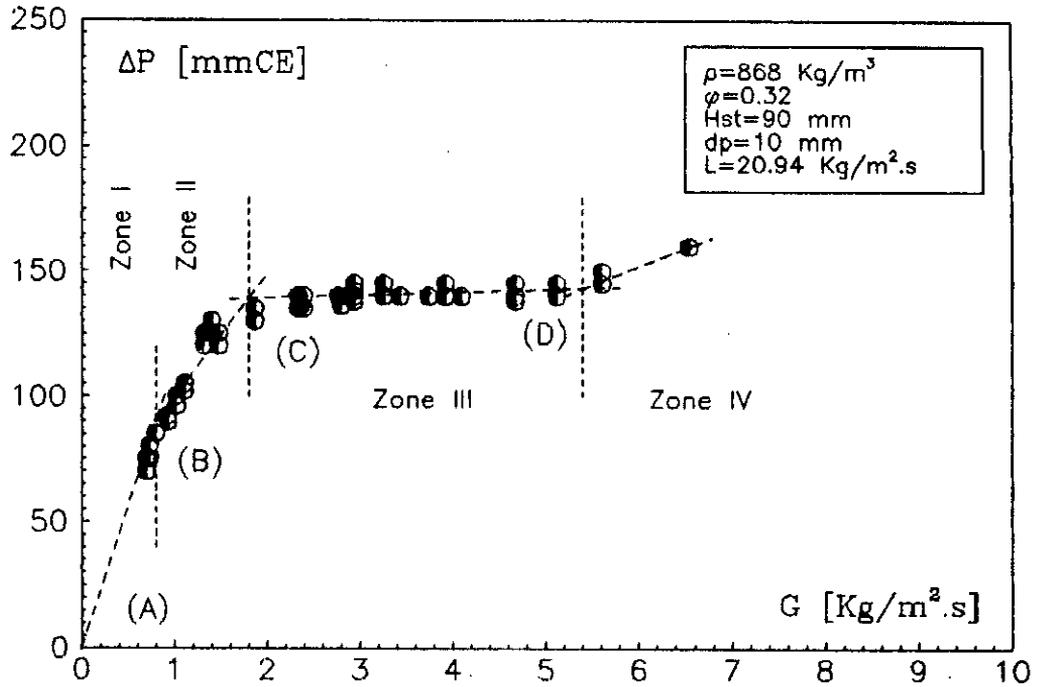


Figure 24 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Domaines de variation

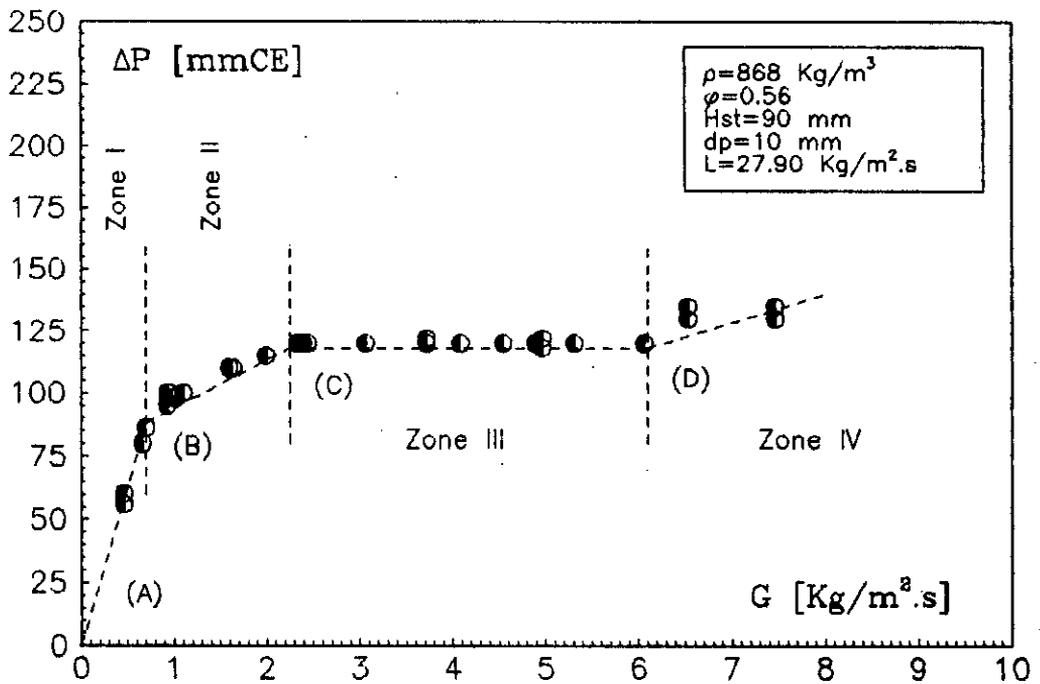


Figure 25 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Domaines de variation

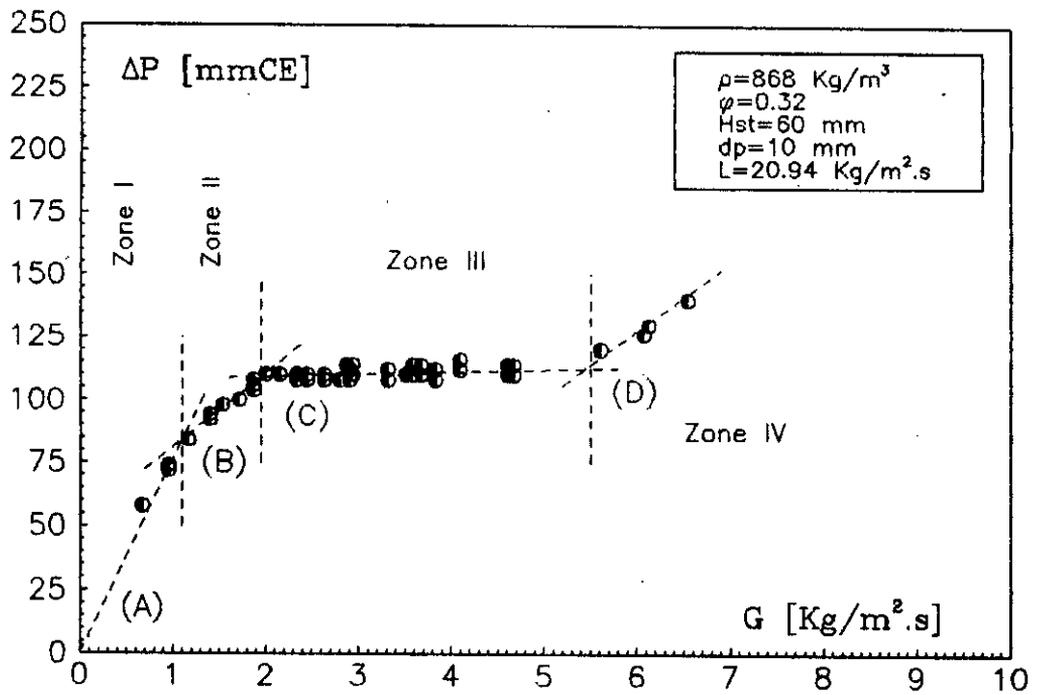


Figure 26 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Domaines de variation

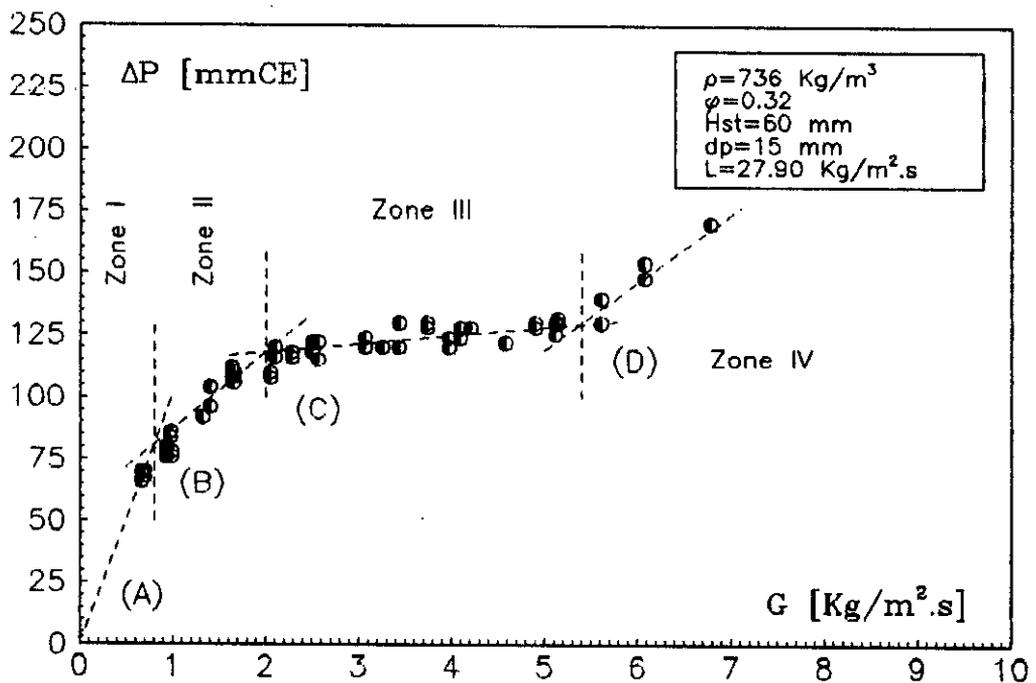


Figure 27 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Domaines de variation

IV.1.2. Influence du débit liquide

les figures 28 à 31 à représentent les courbes de variation des pertes de charges, du lit pour des systèmes donnés, avec la variation du flux liquide.

Les résultats font apparaître que pour les mêmes conditions expérimentales (H_{st} constant, même distributeur de gaz et même type de particules) les pertes de charge augmentent de manière notable avec l'augmentation du débit de l'arrosage liquide à flux de gaz constant. Cette augmentation est observé pour tous les stades hydrodynamiques du lit.

Pour le stade de fluidisation totale, les pertes de charge peuvent être considérées comme étant la somme du poids apparent du garnissage, de la rétention liquide et gazeuse.

IV.1.3. Influence de l'aire libre de la grille support de garnissage

Les figures 32 à 35 représentent la variation des pertes de charges en fonction du flux gazeux avec la variation de l'aire libre de la grille support (ϕ) comme paramètre, à flux liquide (L), et la hauteur statique du garnissage (H_{st}) constants, et pour le même type de garnissage.

Les courbes illustrant ces variations font apparaître que les pertes de charge augmentent de manière appréciable quand l'aire libre de la grille support décroît. En effet lorsque l'aire libre de la grille support diminue, la section libre de passage du gaz et du liquide diminue, ce qui favorise l'augmentation du frottement entre les deux phases, et conduit à l'augmentation de la rétention liquide, ce qui a pour effet l'augmentation de la résistance hydraulique du lit.

D'autre part, le drainage continu du liquide à partir du lit fluidisé dépend du pourcentage d'ouverture de la grille support: si l'aire libre de la grille support n'est pas suffisamment large, l'engorgement est initié près de la grille support, ce qui se traduit d'abord par l'accroissement de la rétention liquide et donc des pertes de charge. Si, l'on augmente encore le flux gazeux dans les mêmes conditions, le lit est engorgé, ce qui réduit, de manière significative, la flexibilité des flux gazeux et liquide.

Ces considérations nous amènent à conclure que l'aire libre de grille de support affecte fortement le comportement hydrodynamique du système. Ces mêmes conclusions ont été notées également par Gel' perin et col. [21], Kito et col. [33], [34], [35]. Gel' perin et col. [21] estiment que les conditions d'engorgement de l'Absorbeur à Contact Turbulent

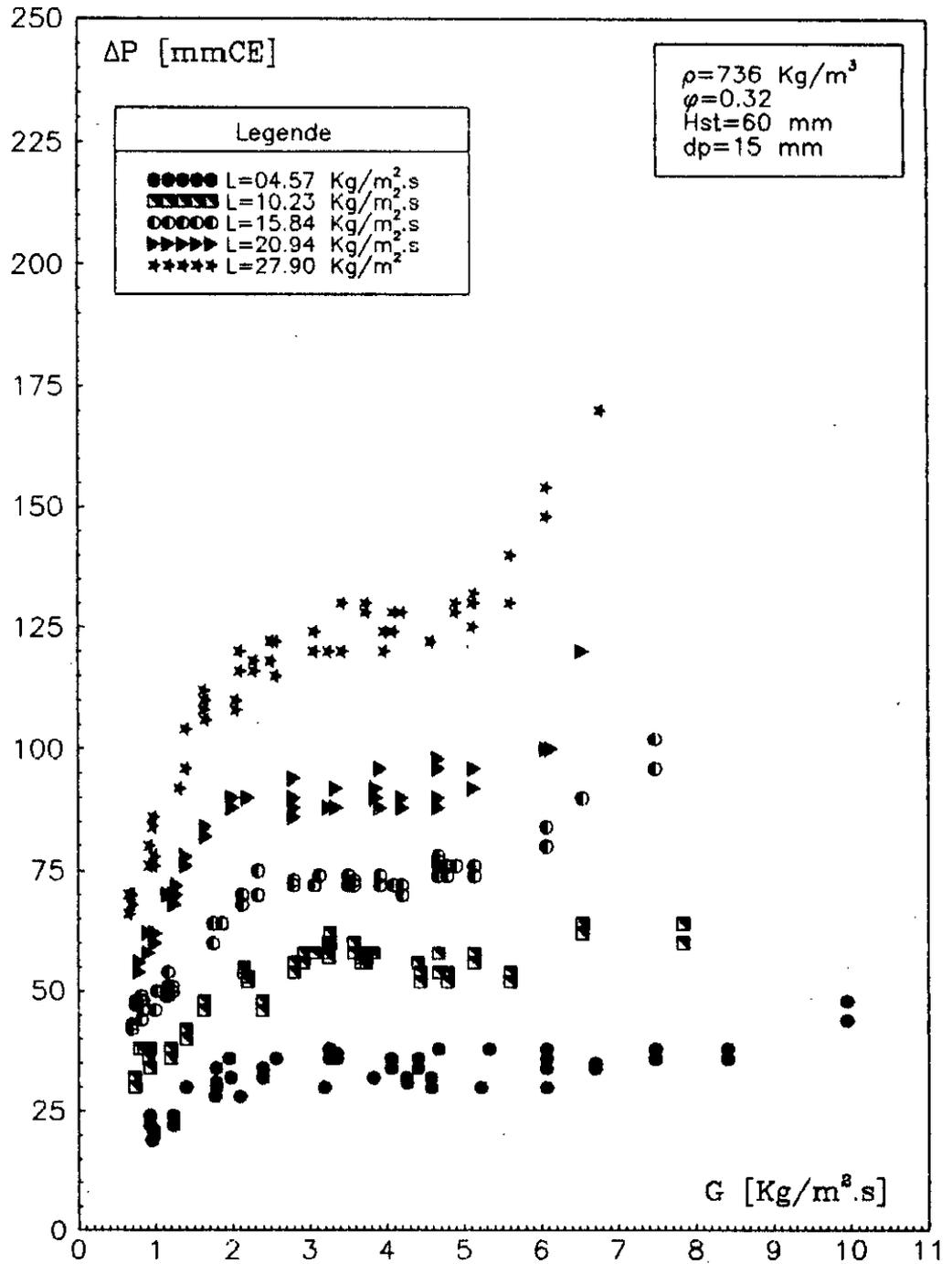


Figure 28 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

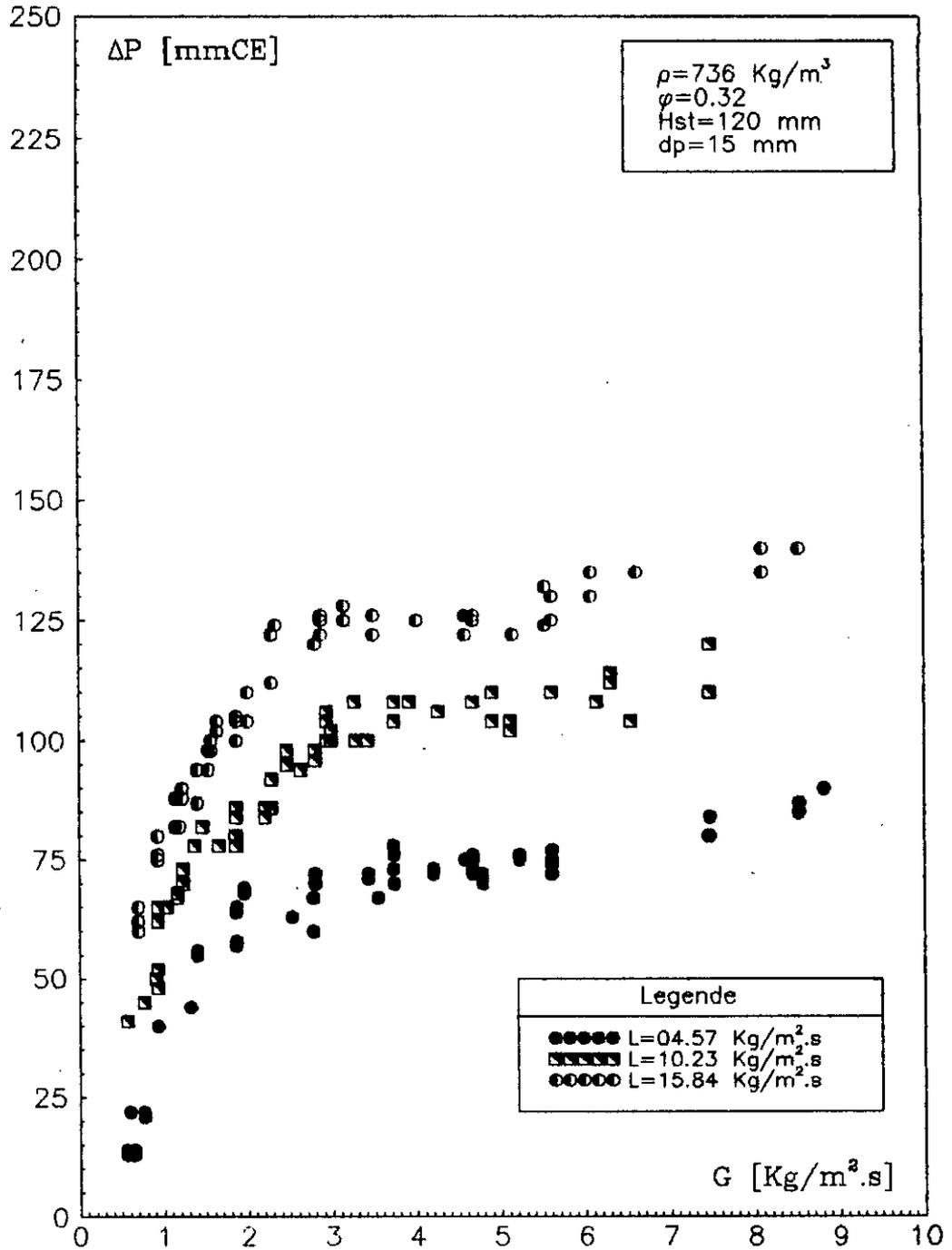


Figure 29 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

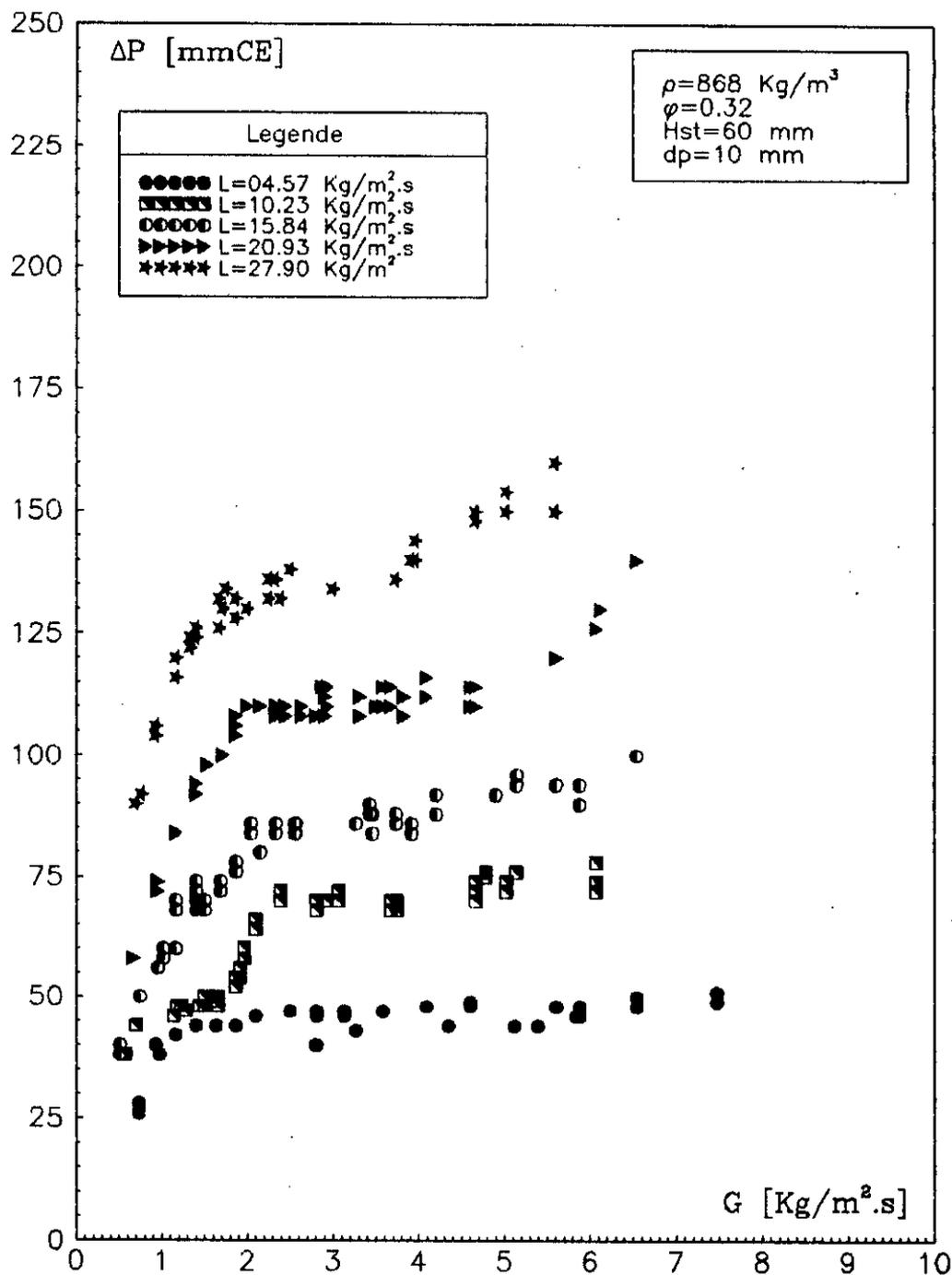


Figure 30 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

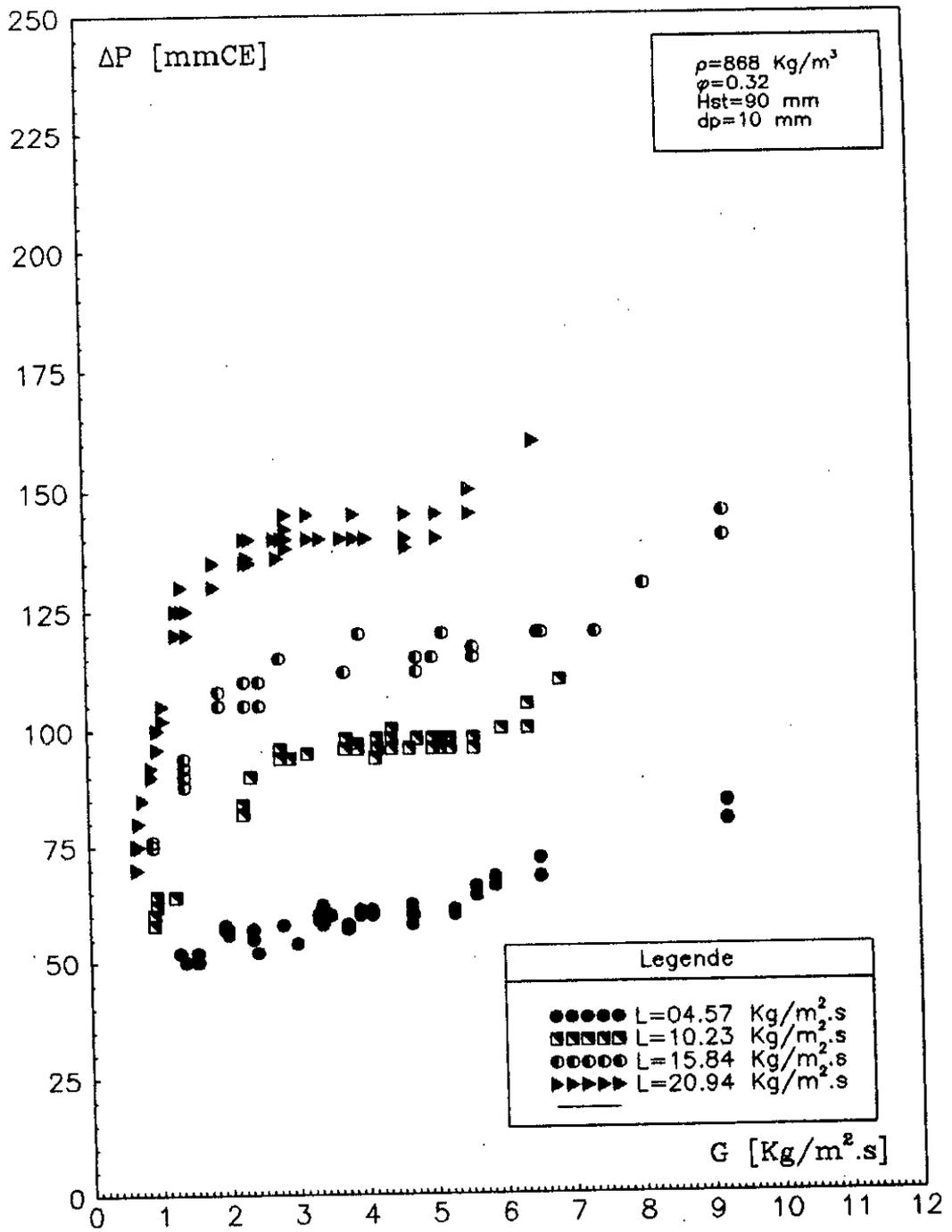


Figure 31 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Effet de l'arrosage liquide

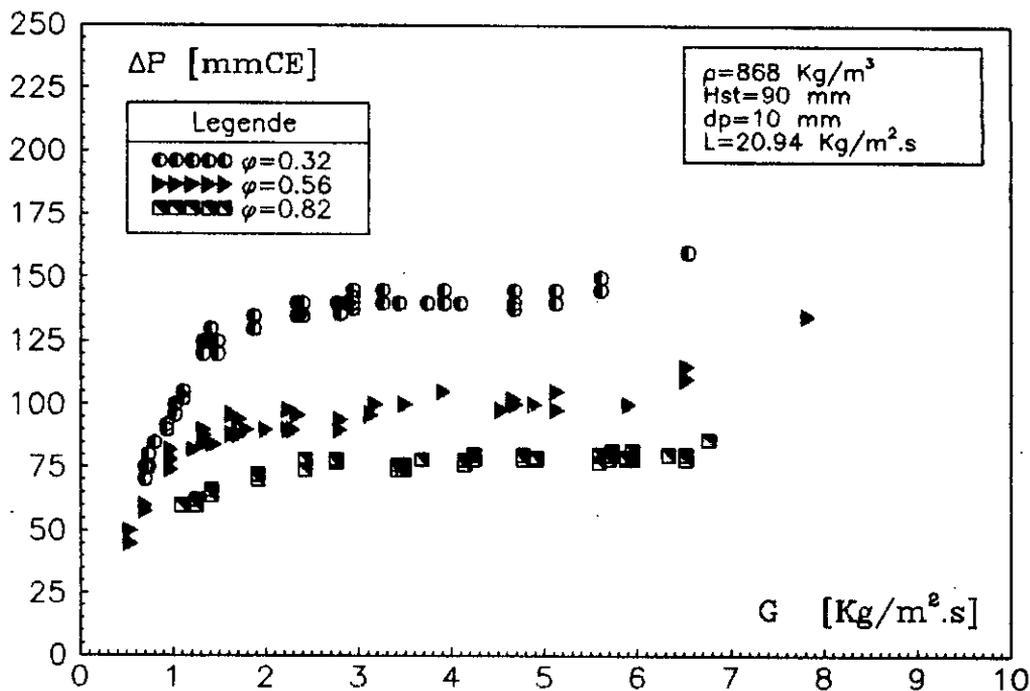


Figure 32 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

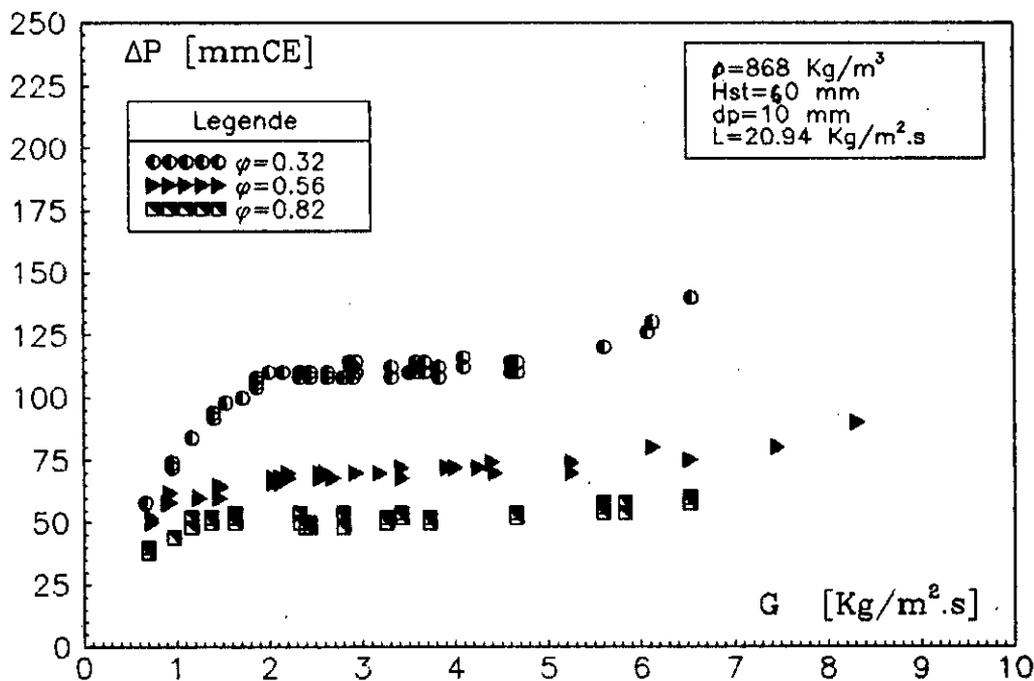


Figure 33 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

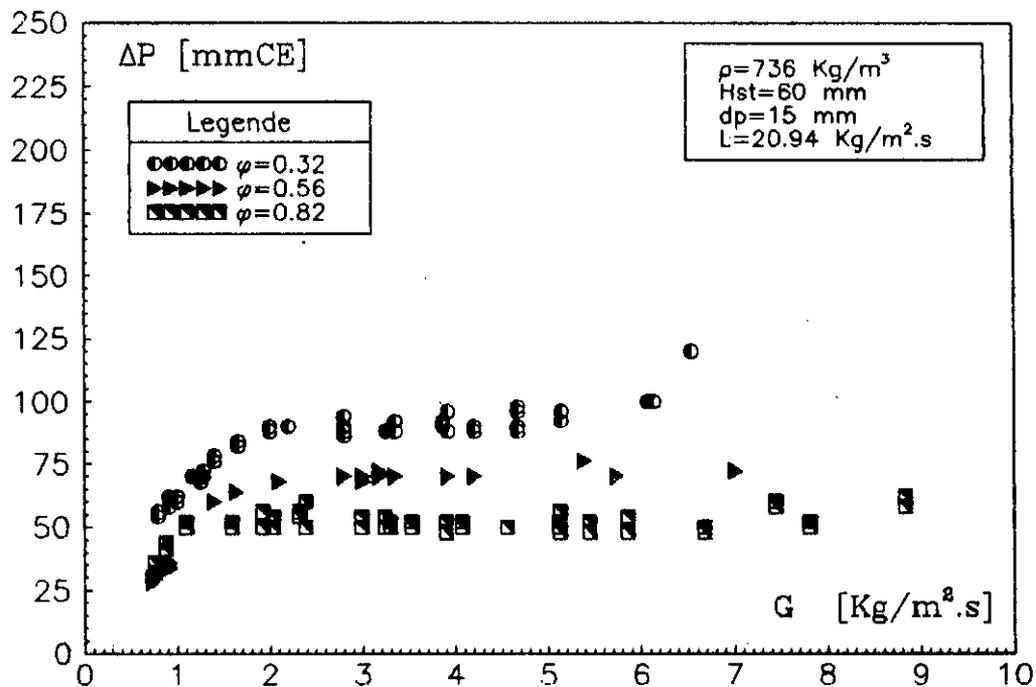


Figure 34 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

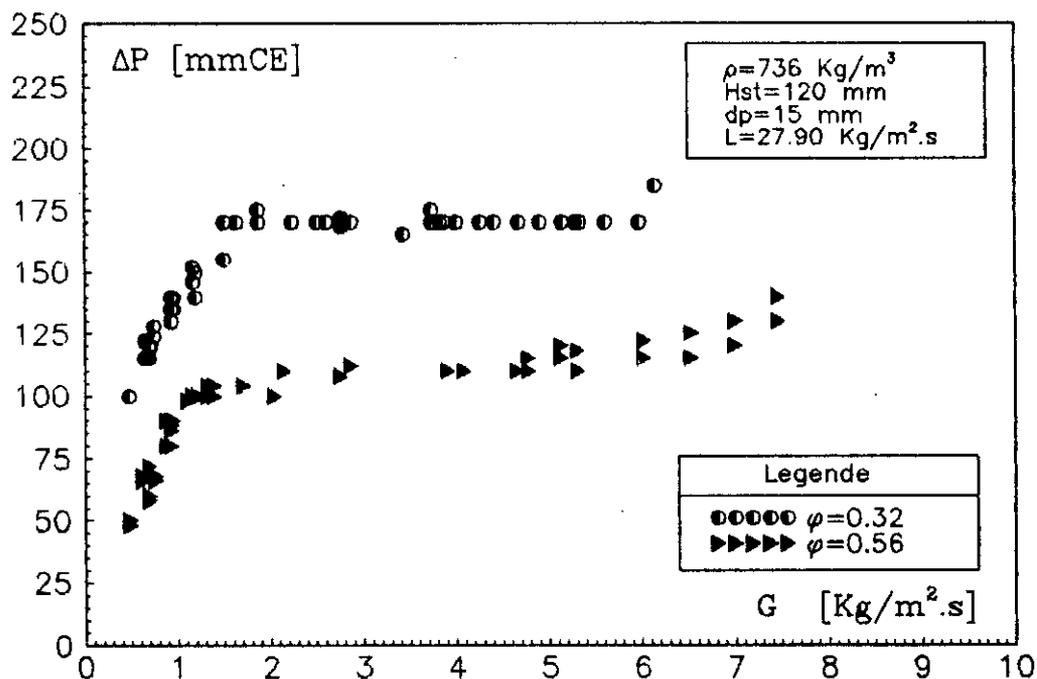


Figure 35 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

(A.C.T.) dépendent fortement des caractéristiques de la grille support et proposent des corrélations dans ce sens.

Les résultats de la variation des pertes de charge avec la variation de l'aire libre de la grille support, dépendent fortement du flux liquide.

Les figures 32 à 35 représentent la variation des pertes de charge en fonction de l'aire libre de la grille support de garnissage pour le même garnissage, la même hauteur statique et des flux liquides différents, mettent clairement en évidence que l'effet de la variation de la grille support est nettement accentué par l'accroissement du flux liquide. En effet, pour de faibles flux liquides ($L=4,57 \text{ Kg/m}^2\text{s}$) l'effet de la variation de la grille support sur les pertes de charge est quasiment nul, tandis qu'il devient significatif pour des débits liquides plus importants ($L=15,84 \div 27,90 \text{ Kg/m}^2\text{s}$)

VI.1.4. Influence de la hauteur statique du garnissage.

Les figures 36 à 39 représentent la variation des pertes de charges pour des hauteurs statiques de garnissage différents, pour le même garnissage et même flux liquide.

Les courbes illustrant ces variations, font apparaître que les pertes de charge augmentent, notablement, avec l'accroissement de la hauteur statique du garnissage. Cet effet est observé pour les deux types de garnissage étudiés, et à travers tout le domaine de variation des flux liquide et gazeux.

Cet effet de la hauteur statique de garnissage, a été mis en évidence par plusieurs auteurs, notamment, Balabekov et Col. [2], [3], Krainev et Col. [39], Wozniak [72], Tichy et Col., [59], Vunjak-novakovic et Col. [66], [68], qui tous s'accordent à dire que les pertes de charge augmentent avec l'accroissement de la hauteur statique.

IV.1.5 Comparaison des résultats expérimentaux

Pour calculer les pertes de charge (Δp) à l'aide de corrélations, il est nécessaire d'estimer au préalable la rétention liquide ($\epsilon_{l,sl}$). Nous estimerons la rétention liquide à l'aide de plusieurs corrélations dont la fiabilité sera testée en confrontant les résultats des pertes de charge expérimentaux avec ceux calculés à l'aide de corrélations faisant intervenir la rétention liquide.

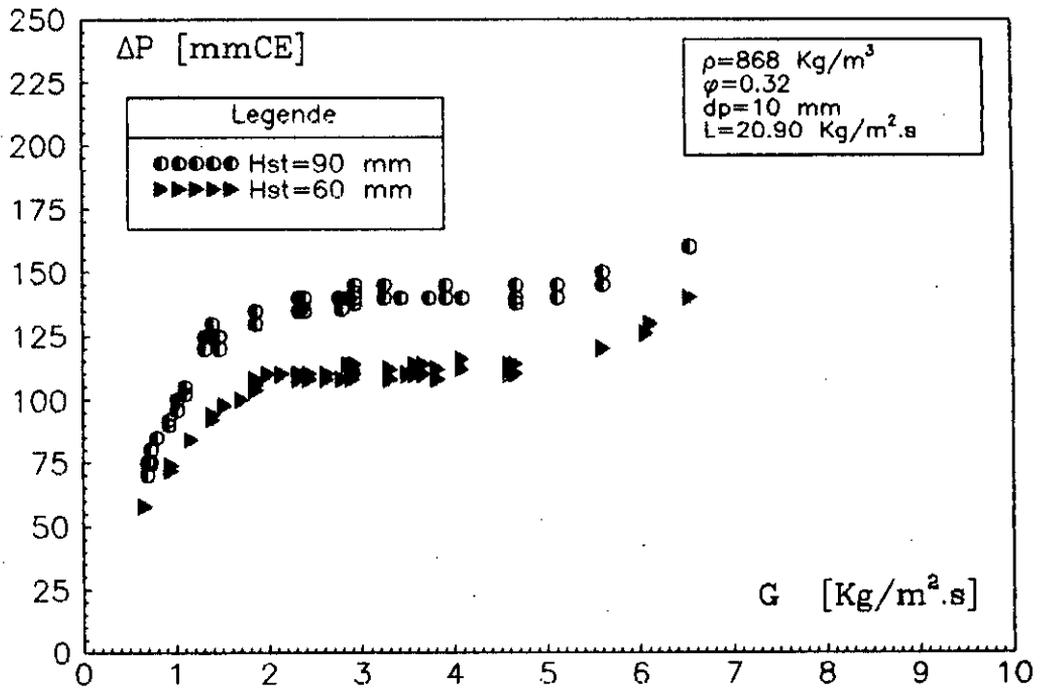


Figure 36 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Effet de la hauteur statique de garnissage

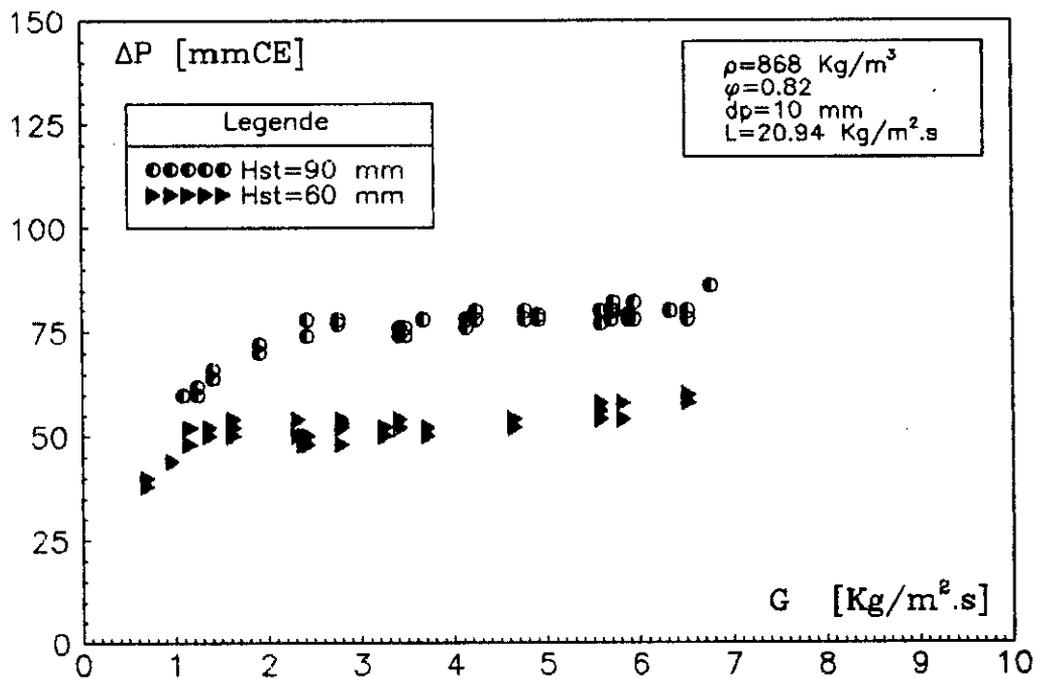


Figure 37 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
 Effet de la hauteur statique de garnissage

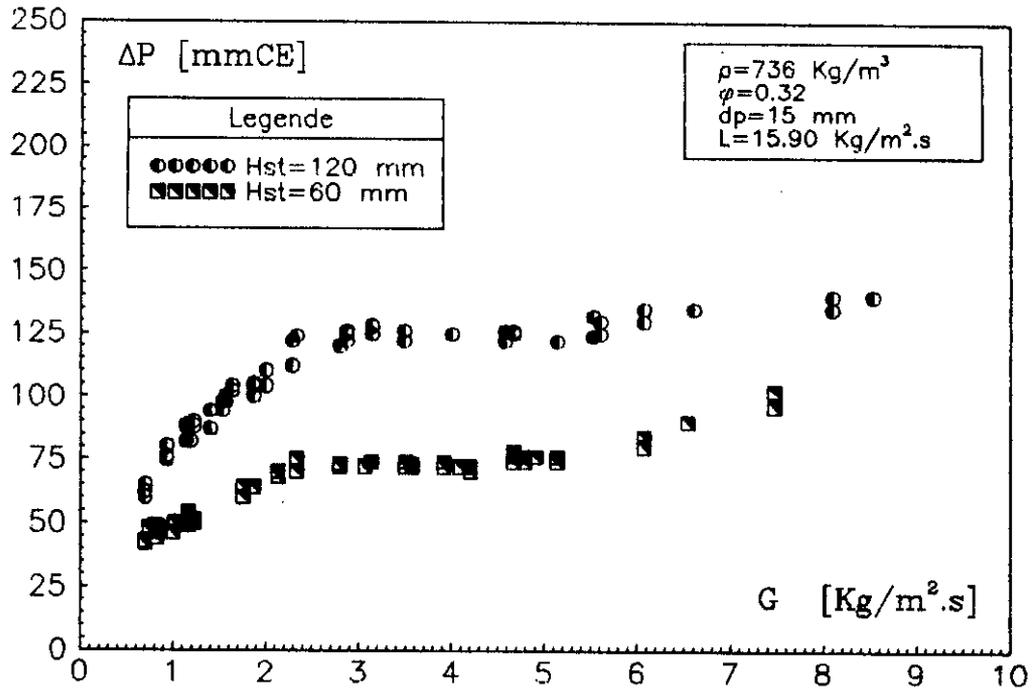


Figure 38 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de la hauteur statique de garnissage

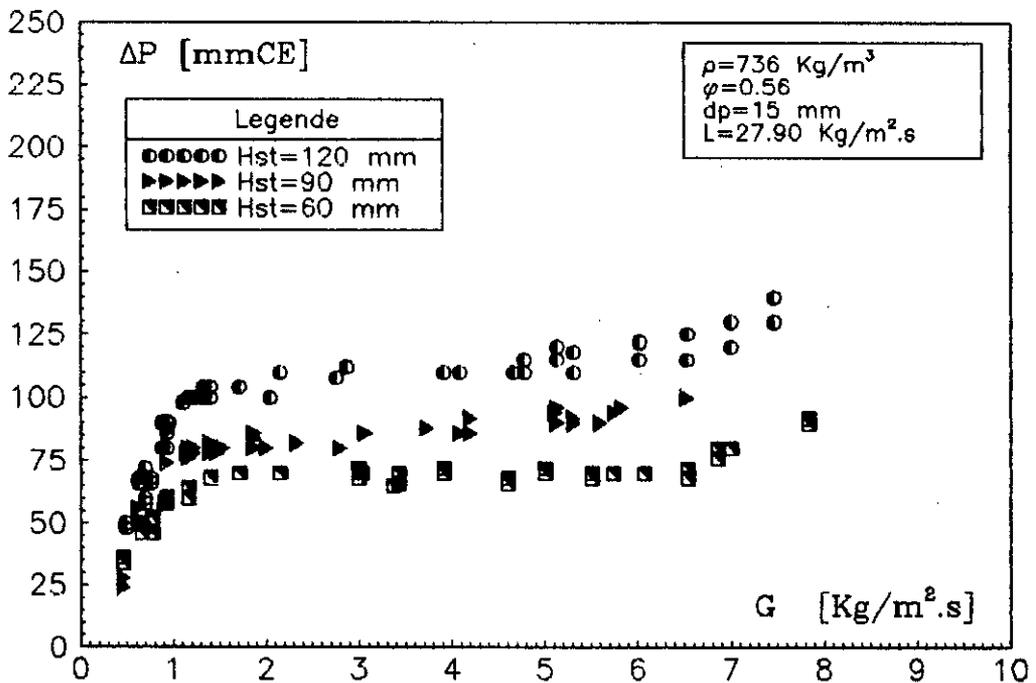


Figure 39 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
Effet de la hauteur statique de garnissage

Les figures 40 et 41 représentent les résultats des estimations de la rétention liquide à partir des corrélations de Vunjak-Novakovic [67], Handl [27], Aksel'rod et Yakonenko [1], et Gel'perin [21].

Les figures 42 à 45 représentent la comparaison des résultats expérimentaux des pertes de charge avec les valeurs estimées à partir de la relation de Vunjak-Novakovic [68] :

$$\Delta P = [(1 - \varepsilon_0) \cdot (\rho_p - \rho_g) + (\varepsilon_{1st} - 0.02) \cdot \rho_l] \cdot g \cdot H_{st} \quad (IV.1)$$

où la rétention de liquide a été estimée suivant les corrélations de certains auteurs. Il apparaît que les estimations des pertes de charges concordent avec les résultats expérimentaux dans le cas où la rétention liquide est estimée selon la corrélation de Vunjak-Novakovic [67].

IV.1.6. Estimation des pertes de charge.

Nous avons déjà établi, que la variation des pertes de charge avec le flux gazeux comprenait quatre domaines bien distincts caractérisés par les limites suivantes:

- zone I: lit fixe où $0 \leq G < U_{gmf}$
- zone II: lit partiellement fluidisé où $G_{mf} \leq G < G_{mf,d}$
- zone III: lit entièrement fluidisé où $G_{mf,d} \leq G < G_{mf,d}$
- zone IV: lit engorgé où $G \geq G_{mf,d}$

Pour la zone de lit fixe, les pertes de charge peuvent être estimées à l'aide de l'équation de Leva [42], comme dans le cas des colonnes à garnissage conventionnelles:

$$\frac{\Delta P}{H_{st}} = \frac{0,064}{d_p^{2,4}} (G^2 / \rho_g) 10^{9,58 \cdot 10^{-2}} (L / \rho_L) \quad (IV.2)$$

Pour le domaine de fluidisation partielle et de fluidisation développé, les pertes de charge sont considérées comme étant la somme des contributions dues au poids apparent du garnissage et la rétention liquide (Vunjak-Novakovic et col. [68])

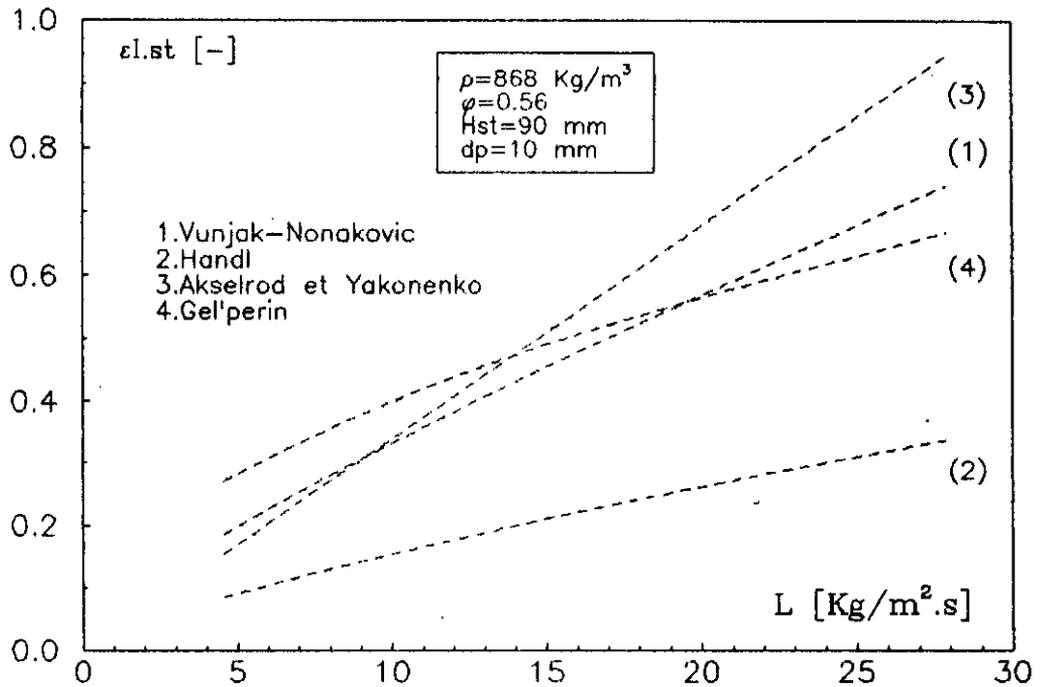


Figure 40 : Estimation de la rétention liquide suivant le flux liquide

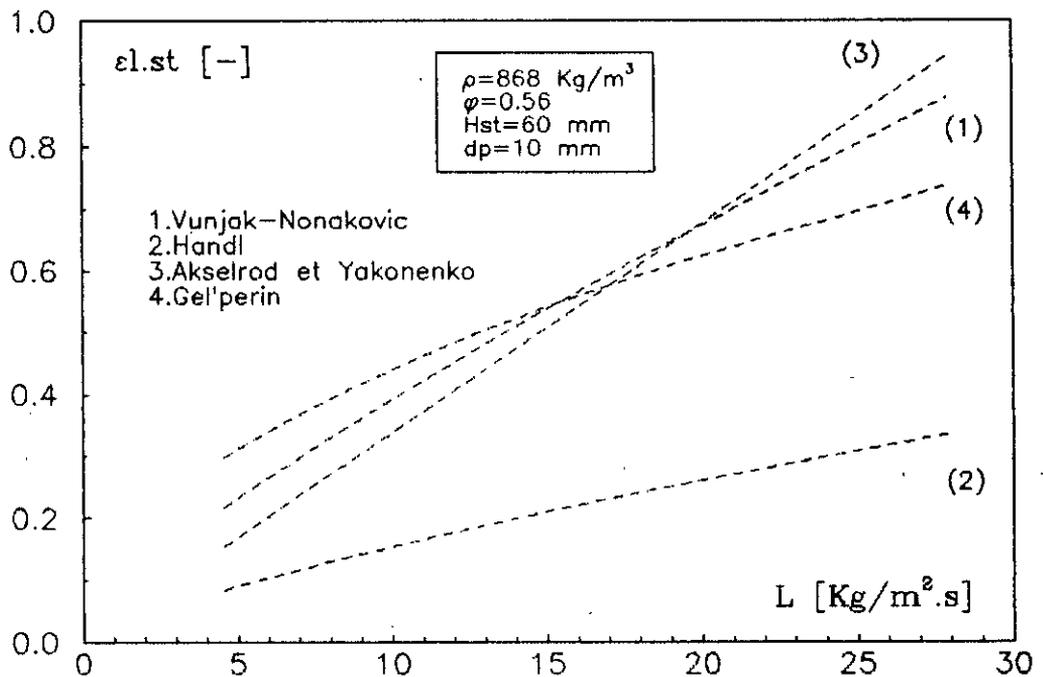


Figure 41 : Estimation de la rétention liquide suivant le flux liquide

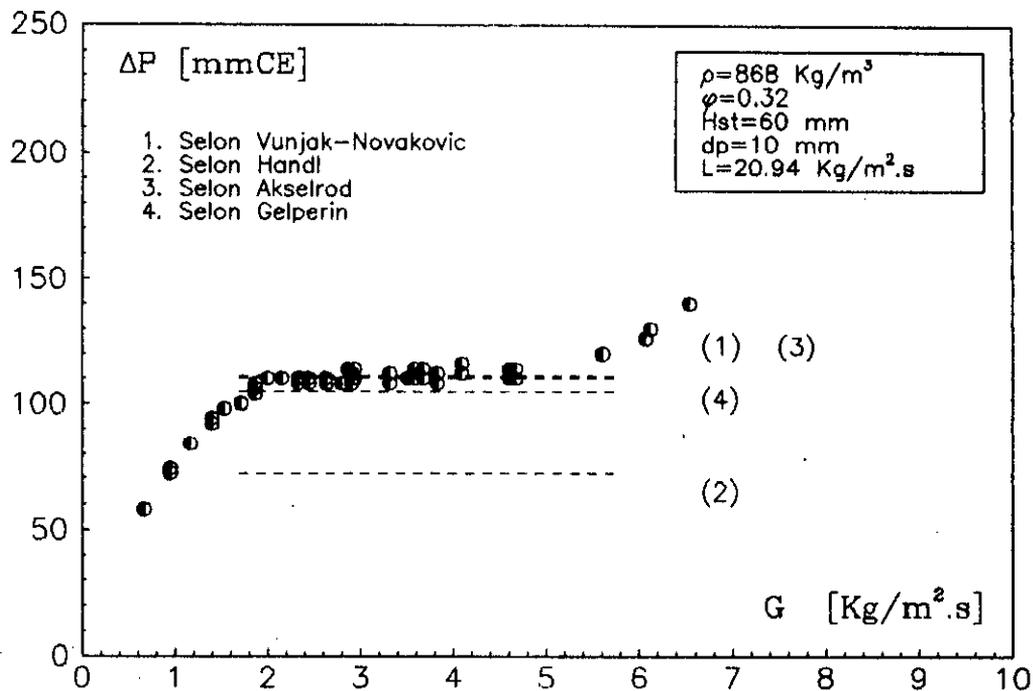


Figure 42 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

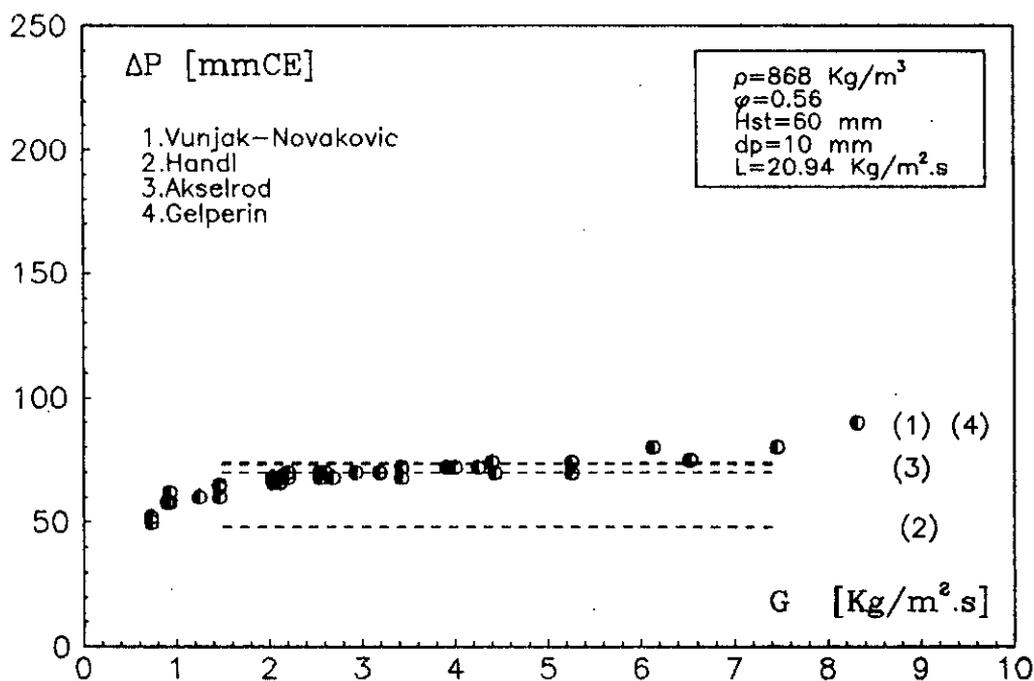


Figure 43 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

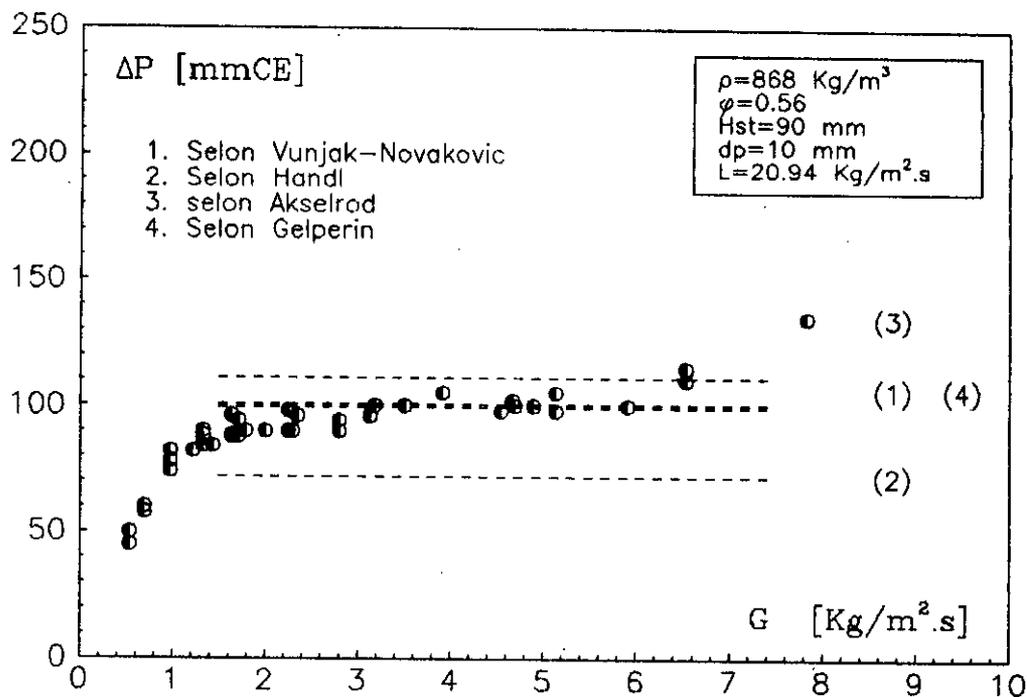


Figure 44 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

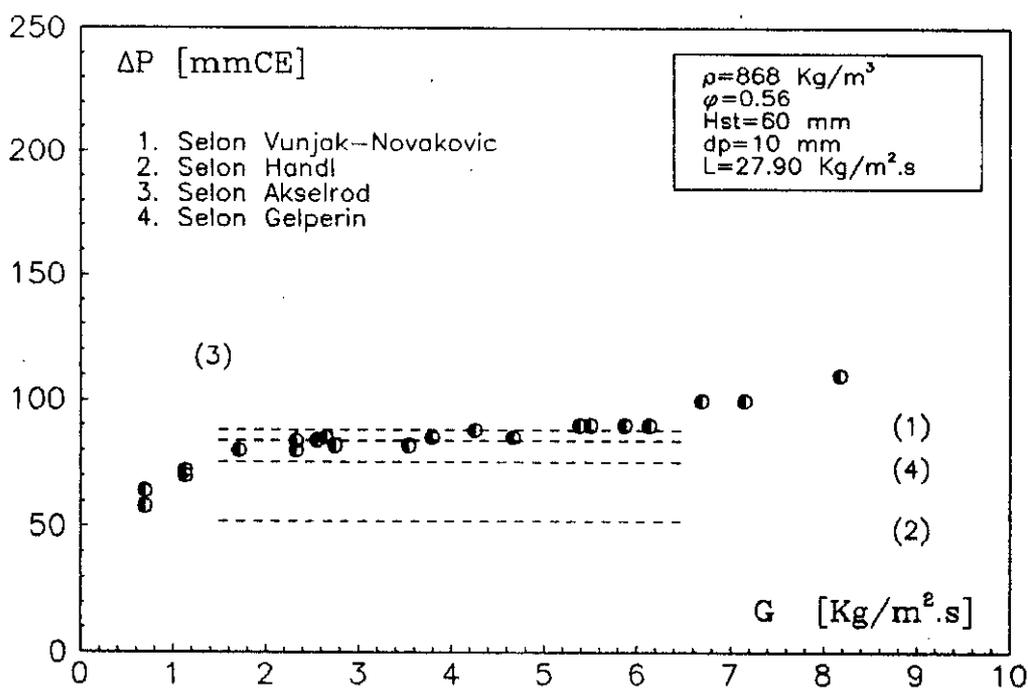


Figure 45 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

L'étude comparative des résultats obtenus par différentes corrélations, montre que la relation de Vunjak-Novakovic est la plus appropriée pour estimer les pertes de charge, et que l'estimation de la rétention liquide dans le domaine de fluidisation totale est plus proche des résultats dans le cas de la corrélation de vunjak-Novakovic (IV.9).

En général la rétention liquide (ε_{lst}) est estimée selon que soit dans le domaine de fluidisation partielle ou de fluidisation développée à l'aide des corrélations suivantes:

a) d'après Balabekov et Col. [2] :

$$\varepsilon_{lst} = C \left[0,828 \left(\frac{L}{U_g} \right)^2 \right]^{k+1} (1-\varepsilon_0) \frac{\rho_p}{\rho_l} \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{-Pour fluidisation partielle: } C = 0,05 ; k = 0,8 \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{-pour fluidisation totale : } C = \left[\frac{0,695}{\varphi^2} \right] \left[\frac{0,005}{dp} \right] \left[\frac{\rho_p}{\rho_l} \right]^{-0,74} \left[\frac{L}{10^2} \right]^2 \quad (\text{IV.5})$$

$$k = \left[\frac{1,58}{\varphi^{-0,16}} \right] \left[\frac{0,005}{dp} \right]^{-0,1} \quad (\text{IV.6})$$

b) D'après Gel'perin et Kruglyakov [25] :

$$\varepsilon_{lst} = \rho_l^{0,73} L^{0,31} Hst^{0,78} dp^{-0,07} (c+4,54.Hst^{0,78}) \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{-Pour fluidisation partielle: } C = 0$$

$$\text{-pour fluidisation développé: } C = \left[\frac{U_g - U_{gmf}}{\varphi^{0,86}} \right]$$

b) D'après Vunjak-Novakovic et col. [68] :

-Pour le lit fixe: (Au dessous du point de charge):

$$\varepsilon_{lst} = 2,48 \cdot 10^{-3} \left[\frac{Hst}{D_c} \right]^{-0,567} dp^{-0,56} L^{0,719} + 0,02 \quad (\text{IV.8})$$

-Pour le lit fluidisé:

$$\epsilon_{lst} = 4,43 \cdot 10^{-3} dp^{-0,494} L^{0,812} \left[\frac{\rho_p}{\rho_l} \right]^{0,090} \left[\frac{H_{st}}{D_c} \right]^{-0,433} + 0,02 \quad (IV.9)$$

En conclusion, les résultats font apparaître que les pertes de charge à travers le lit augmentent avec l'accroissement du flux liquide, de la hauteur statique du garnissage et avec la dimension de l'aire libre de grille support. A travers l'effet du flux liquide et de l'aire libre de la grille support de garnissage, la rétention liquide apparaît comme étant le paramètre déterminant pour l'évaluation des pertes de charge.

La prédiction des pertes de charge, dépend, dès lors, de l'estimation correcte de la rétention liquide. D'autre part, l'évaluation des pertes de charge dépendra également de l'état hydrodynamique du lit et de l'augmentation du flux gazeux. En effet, selon que l'on soit en régime de lit fixe, de fluidisation partielle ou de fluidisation totale, il faudra choisir la corrélation appropriée pour l'estimation des pertes de charge.

IV.2. Etude de l'expansion du lit.

Nous avons déterminé expérimentalement l'expansion du lit associée à l'écoulement triphasé du mélange air/eau circulant à contre-courant à travers le lit de garnissage solide.

Les effets des variables opératoires, telles que les flux gazeux (G) et liquide (L), l'aire de la grille support de garnissage (ϕ), et la hauteur statique du lit (H_{st}), ont été étudiés dans le cas de deux garnissages de dimensions et de masses volumiques (d_p et ρ_p) différentes.

IV.2.1. Influence de flux gazeux.

Les résultats expérimentaux présentés sur les figures 46 à 49 représentant la variation de l'expansion du lit en fonction du débit gazeux, à débit liquide constant, montrent que pour les mêmes conditions expérimentales, l'expansion du lit croît avec l'augmentation du flux gazeux. Ces résultats sont en conformité avec les observations de différents auteurs.

Ceci peut être expliqué par le fait que lors de l'augmentation du flux gazeux, à un débit liquide constant, la rétention de la phase gazeuse augmente, la rétention liquide demeurant pratiquement constante.

D'autre part, les courbes représentant la variation de l'expansion du lit, font apparaître, en général, l'existence de trois zones distinctes. Ceci est observé pour les différents distributeurs de gaz et pour les différentes particules. Un exemple de courbes est donné sur les figures 50 à 53.

Pour ces systèmes représentatifs des différentes conditions opératoires, nous avons calculé les pentes des courbes représentant la variation de l'expansion du lit en fonction du flux gazeux, en assimilant ces courbes à trois droites représentant les trois zones de variation de l'expansion, les pentes des droites représentant les domaines de variation de l'expansion du lit ont été calculées par régression linéaire et les expressions de l'évolution de l'expansion du lit en fonction du flux gazeux sont résumées sur le tableau A.6 porté en annexe.

L'existence de ces trois zones de variation de l'expansion du lit, peut être interprétée par le profil de variation des rétentions de gaz et de liquide, avec l'augmentation du flux gazeux.

En effet, la rétention du gaz augmente de manière pratiquement uniforme lors de l'accroissement du flux gazeux, par contre la rétention liquide augmente brusquement lors du stade de fluidisation partielle (Zone I), et se stabilise ensuite à une valeur pratiquement constante (Zone II). Par la suite, avec l'augmentation du flux gazeux, on arrive au début d'engorgement, caractérisé par l'entraînement du liquide se traduisant par un accroissement significatif de la rétention liquide et une brusque et rapide augmentation de l'expansion (Zone III).

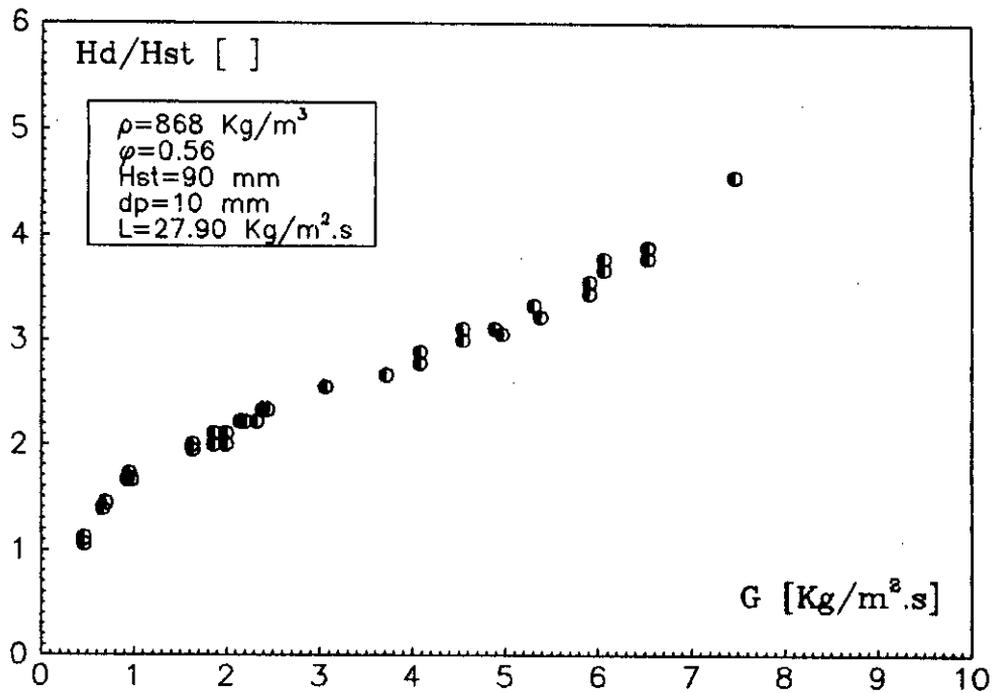


Figure 46 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux

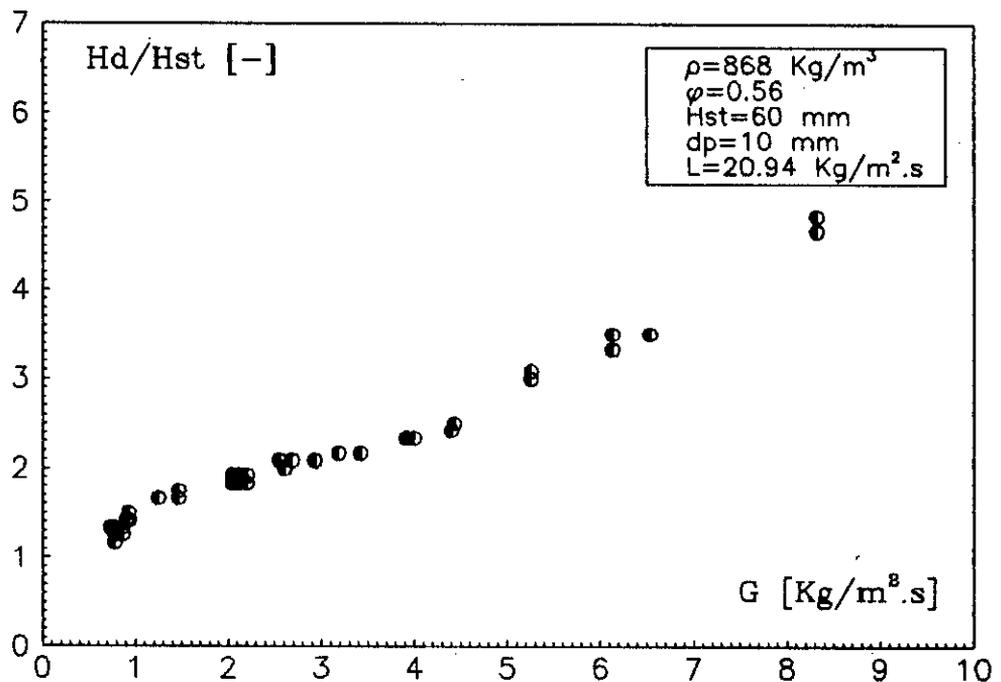


Figure 47 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux

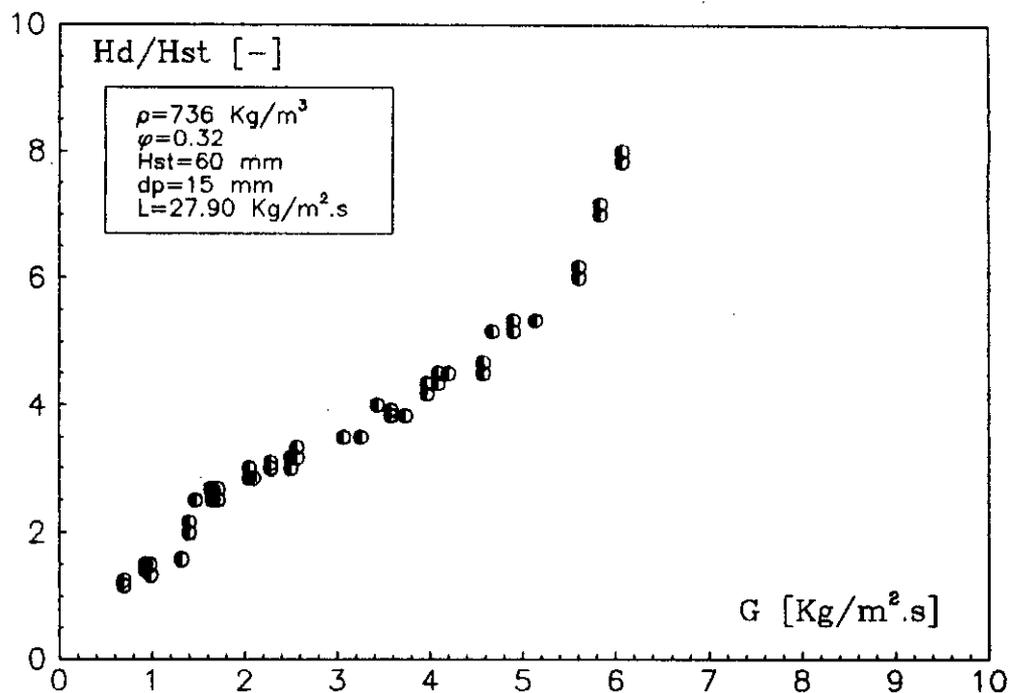


Figure 48 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux

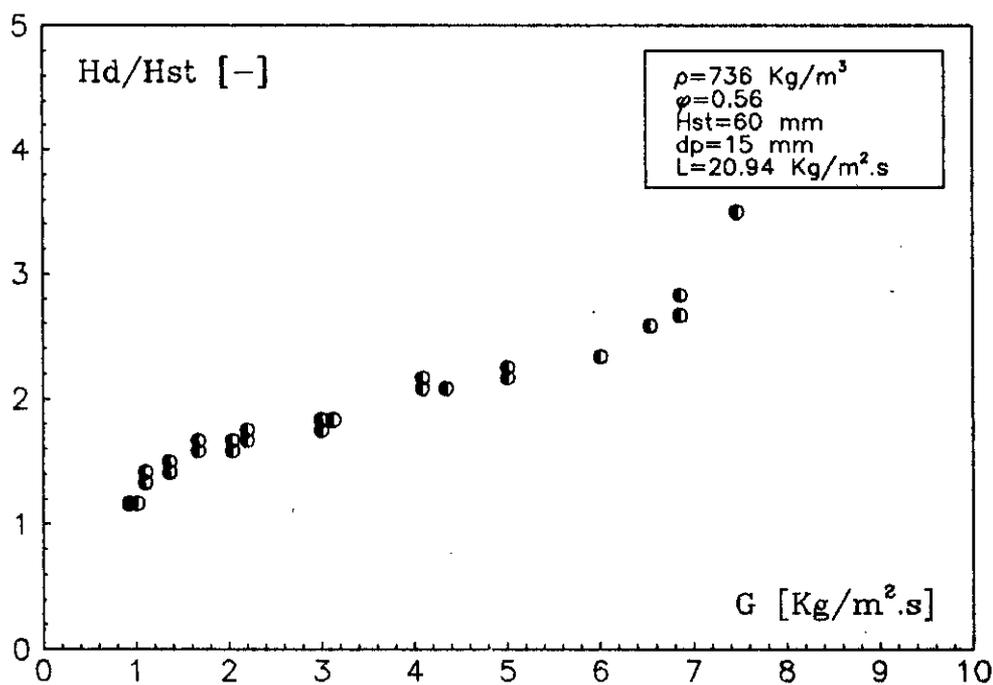


Figure 49 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux

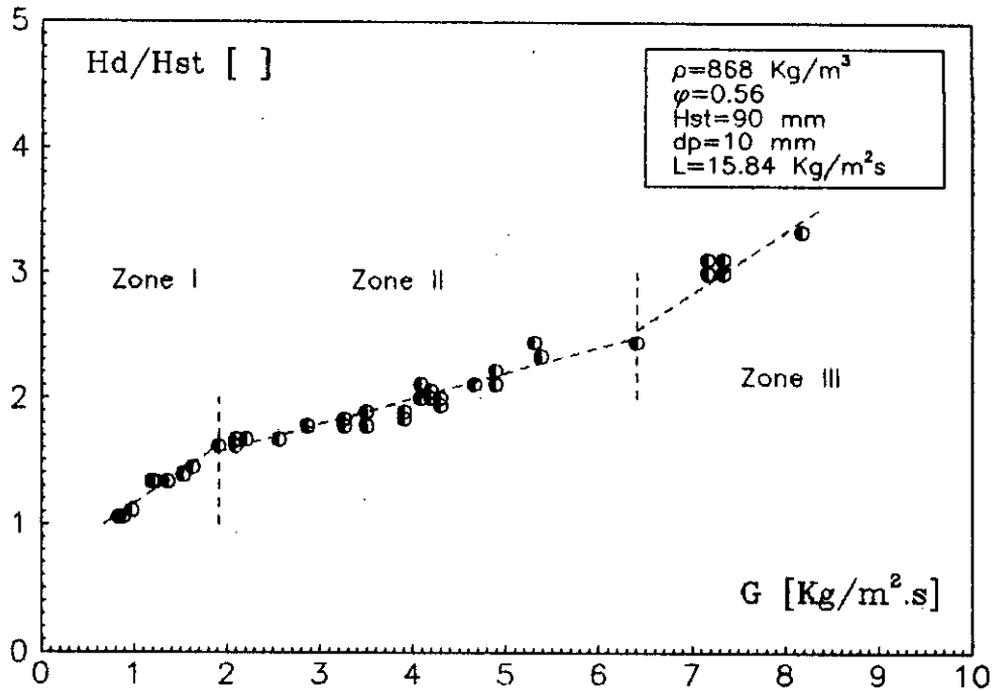


Figure 50 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Zones de variation de l'expansion

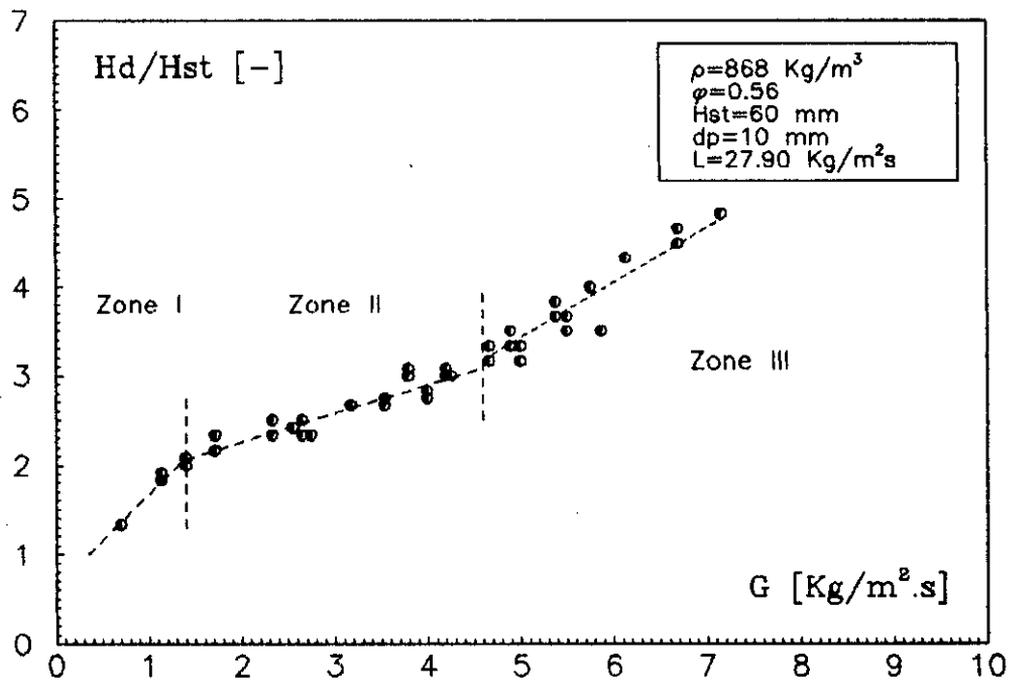


Figure 51 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Zones de variation de l'expansion

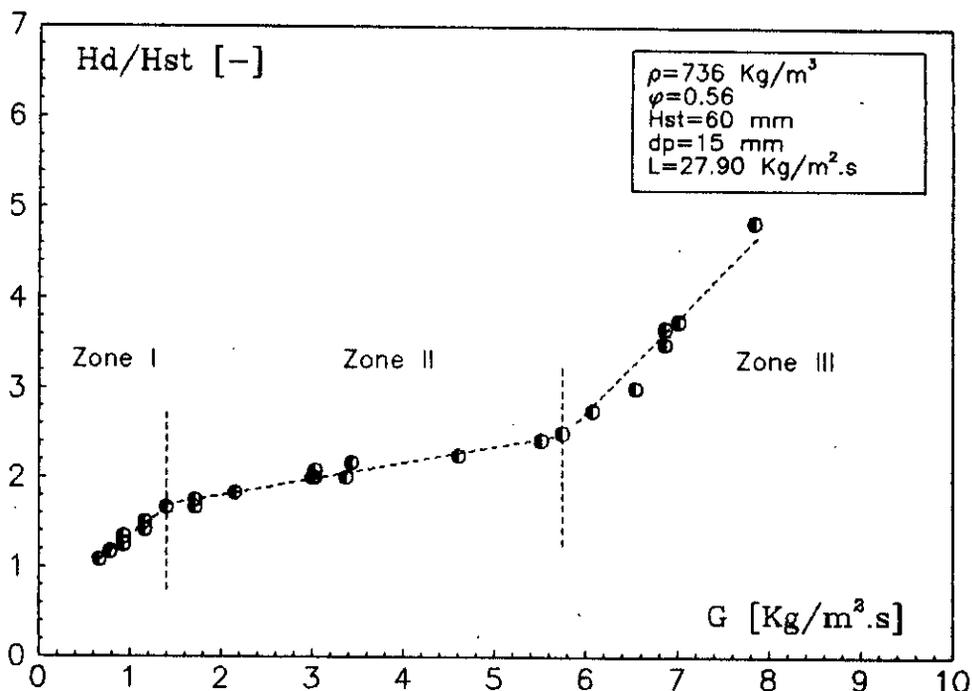


Figure 52 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Zones de variation de l'expansion

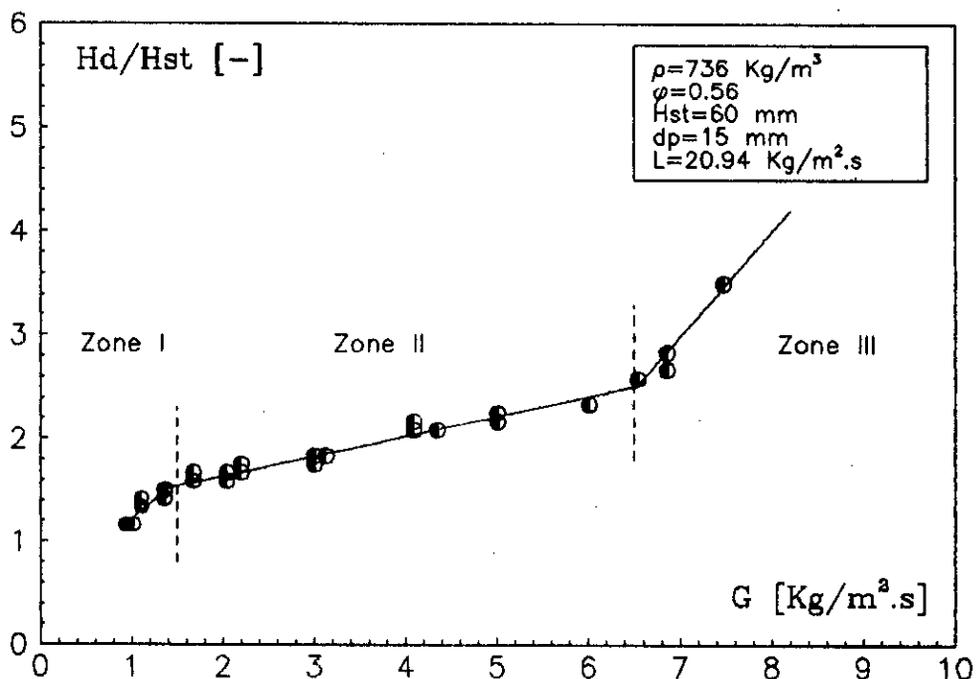


Figure 53 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Zones de variation de l'expansion

IV.2.2. Influence du débit liquide.

Les figures 54 à 57 représentent les courbes de variation de l'expansion pour des systèmes données, avec la variation du débit liquide.

Les résultats expérimentaux font apparaître que pour les mêmes conditions expérimentales (H_{st} constante, même distributeur de gaz et même type de particule), l'expansion du lit croît de manière appréciable avec l'augmentation du débit liquide à débit de gaz constant, ce qui confirme les résultats de Chen et Douglas [10].

L'augmentation de l'expansion du lit avec le débit liquide, à débit de gaz constant, peut être expliquée par le fait que lors de l'accroissement de l'arrosage liquide, la rétention liquide augmente, alors que la rétention de la phase gazeuse demeure pratiquement constante, ce qui est en accord avec l'équation:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = \frac{\epsilon_{l,st} + \epsilon_{s,st}}{1 - \epsilon_g} \quad (IV.10)$$

IV.2.3. Influence de l'aire libre de la grille support de garnissage.

Les figures 58 à 61 montrent la variation de l'expansion du lit en fonction de l'aire libre de la grille support de garnissage à débit liquide, masse volumique, diamètre de particules de garnissage et hauteur statique constants.

Les courbes illustrant ces variations font apparaître que l'expansion du lit augmente, de manière significative, quand la section libre de la grille support diminue. En effet, lorsque l'aire de la grille support diminue, la vitesse superficielle du gaz croît, ce qui favorise l'expansion et d'autre part, la fraction liquide dans le lit augmente ce qui favorise également l'expansion. Cet effet a été mis également en évidence par Levsh et col. [44], et Kito col. [30], [34], [35].

Les résultats font aussi apparaître que l'augmentation de l'expansion du lit avec la diminution de l'aire libre de la grille support est accentuée par l'augmentation du flux gazeux.

Le même effet est observé pour le débit liquide. En effet pour de grands débits liquides ($L=27,90 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$) l'augmentation de l'expansion est appréciable, alors qu'il devient pratiquement nul pour un débit liquide de $4,57 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$.

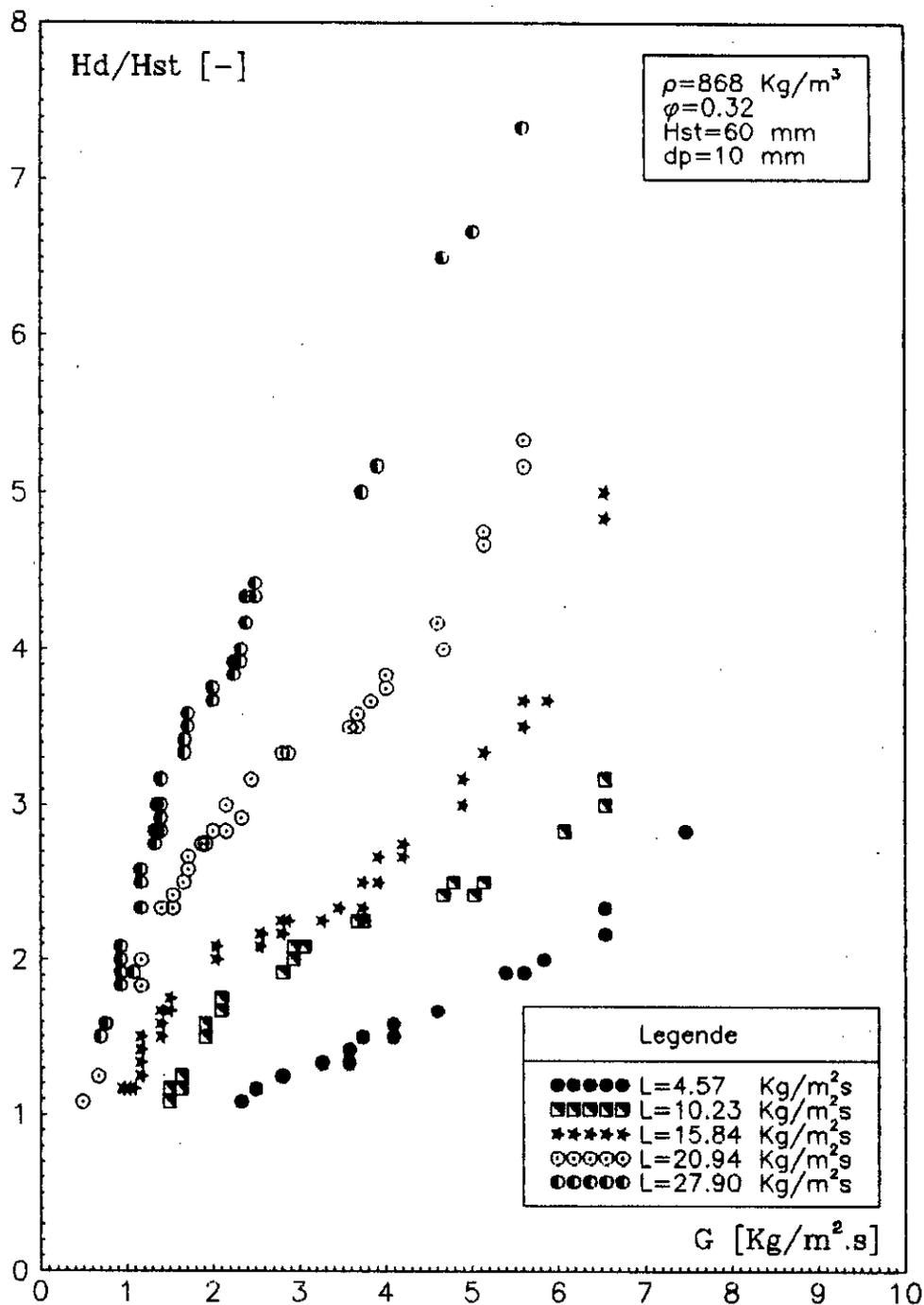


Figure 54 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

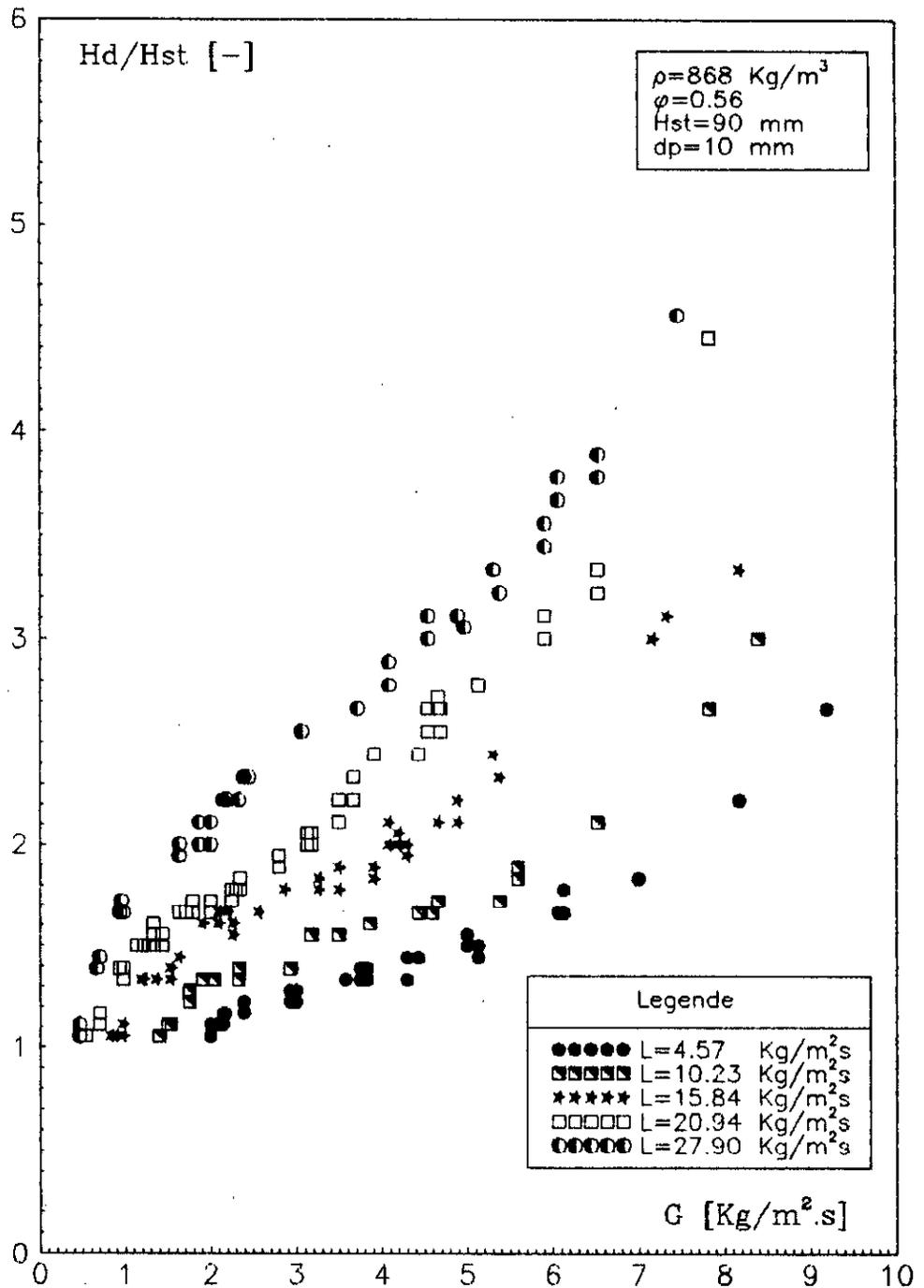


Figure 55 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

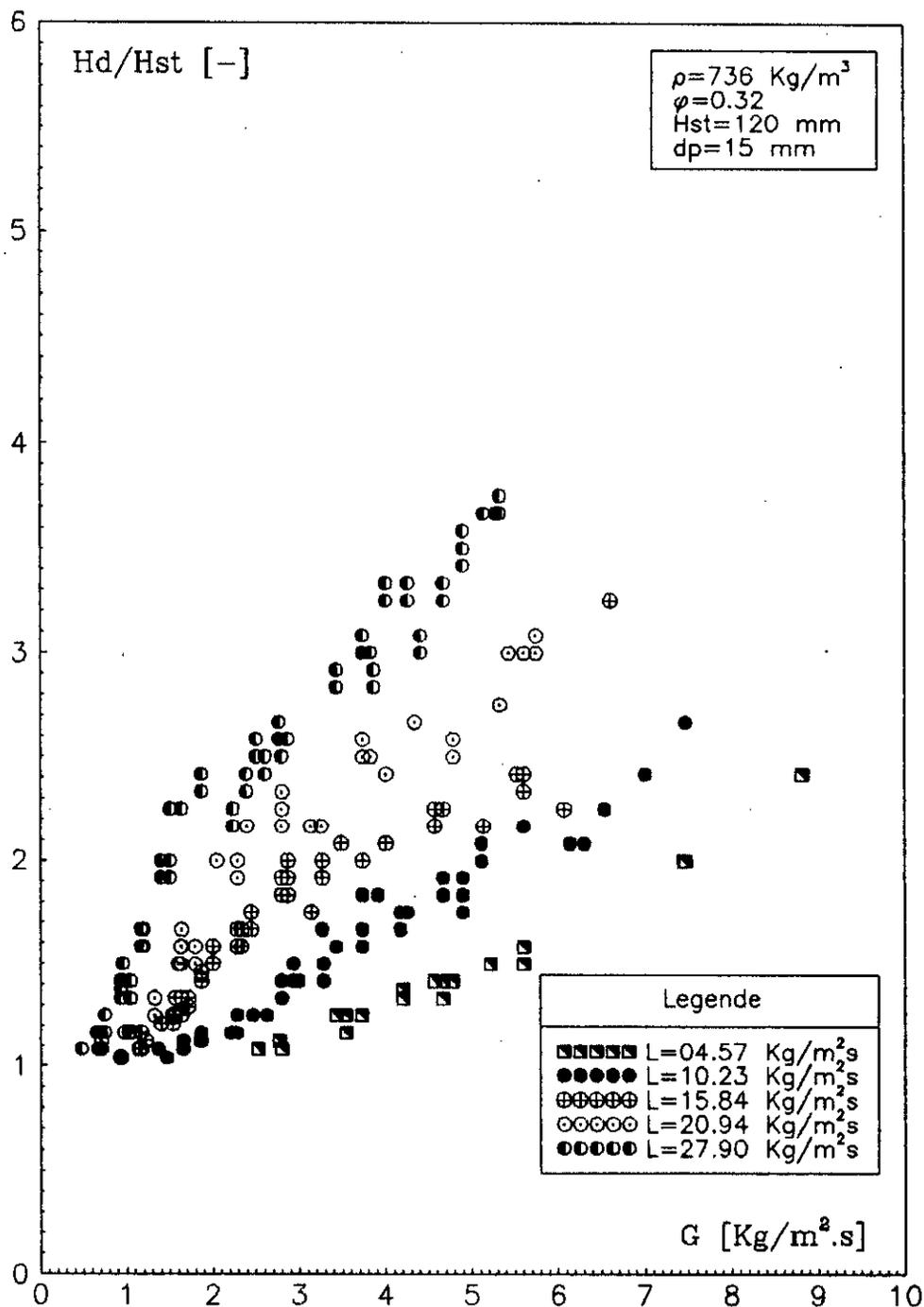


Figure 56 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

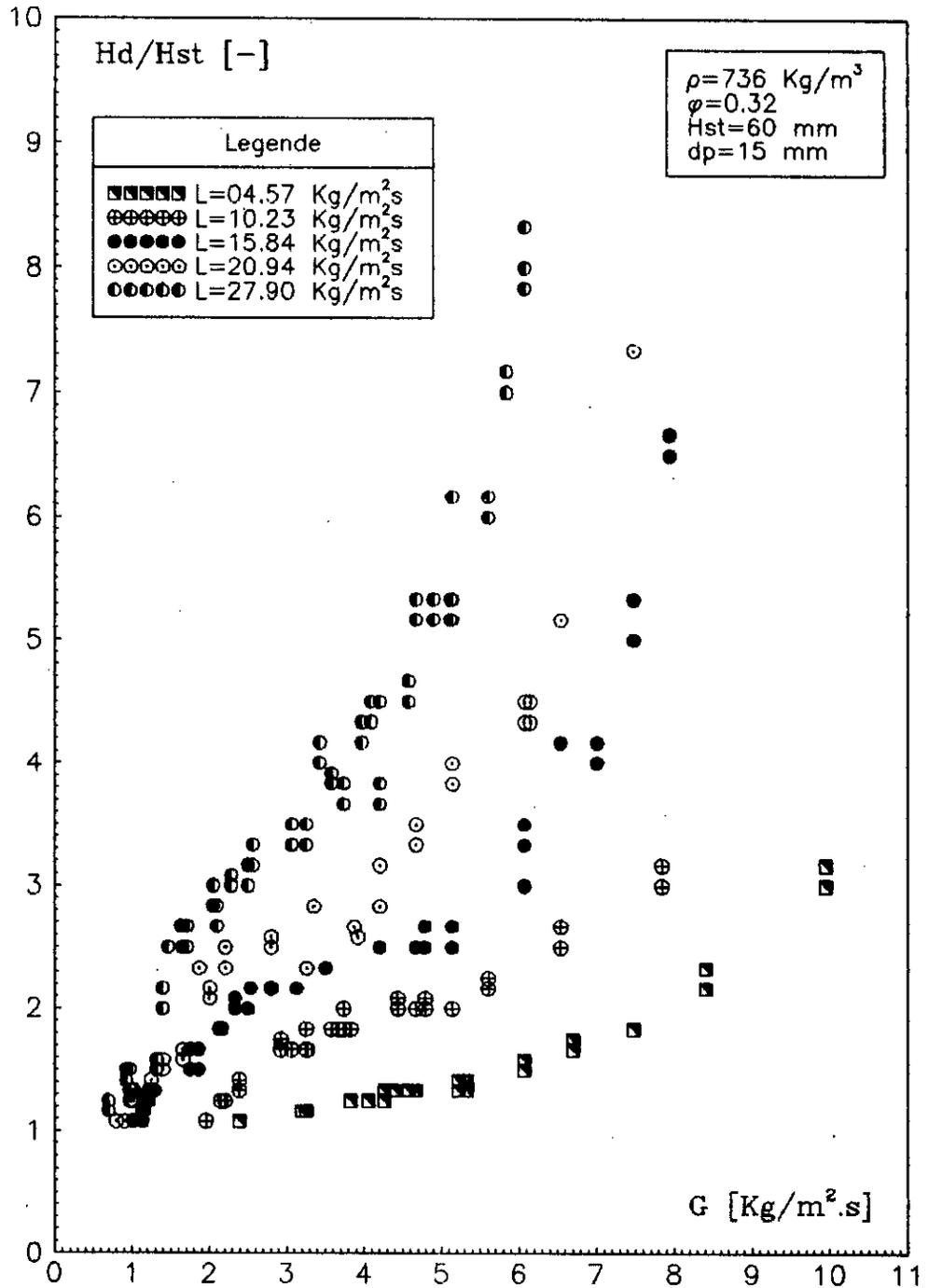


Figure 57 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'arrosage liquide

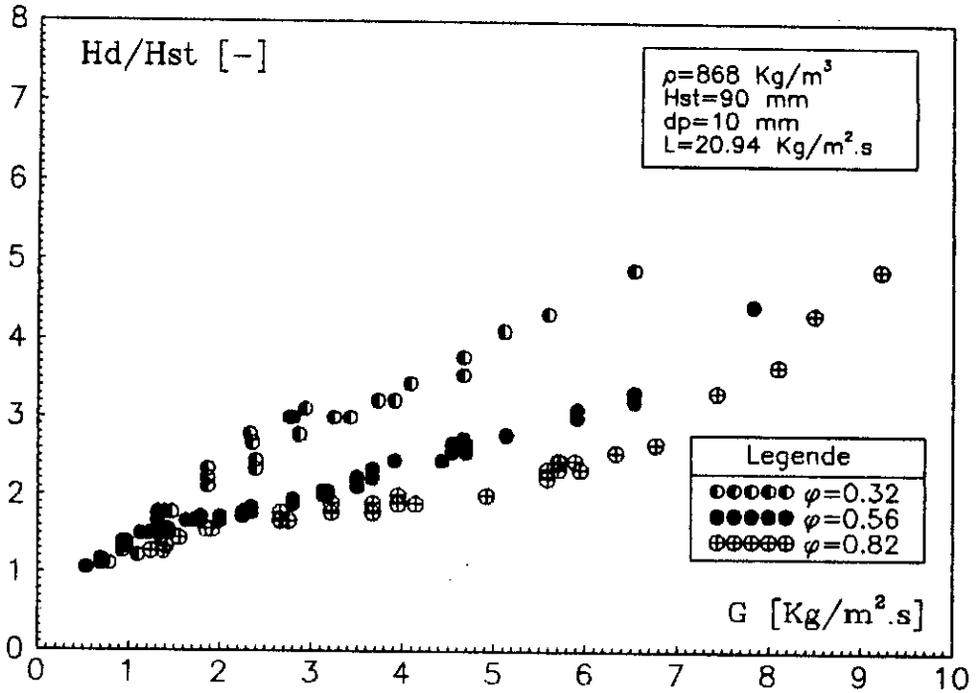


Figure 58 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support

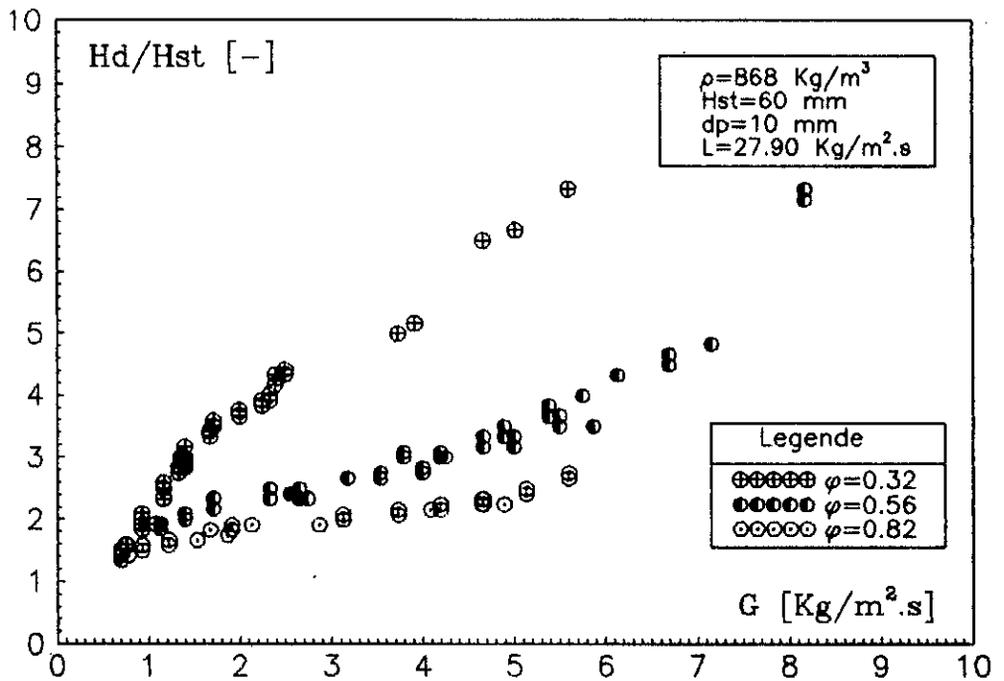


Figure 59 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support

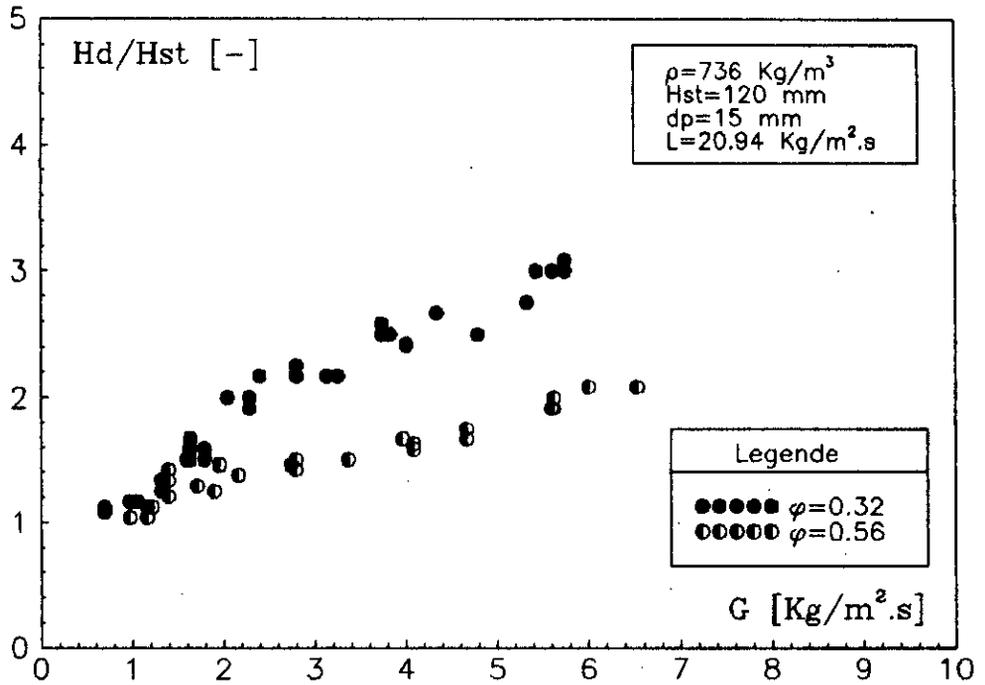


Figure 60 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support

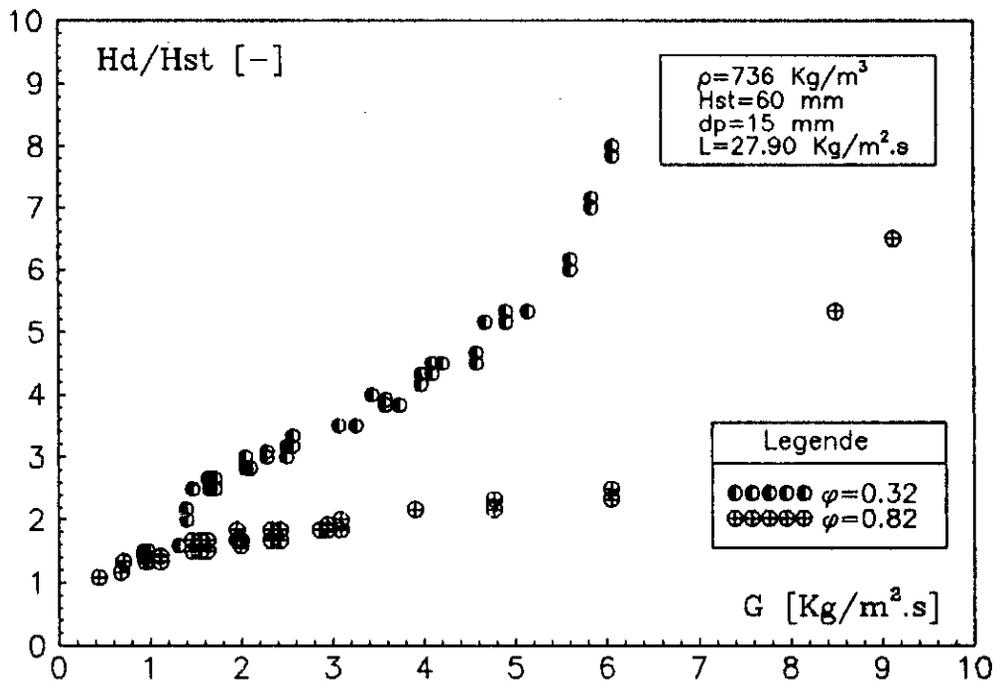


Figure 61 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support

IV.2.4. Effet de la hauteur statique de garnissage.

Les exemples sur les figures 62 à 65, illustrant la variation de l'expansion du lit en fonction de la hauteur statique, pour des systèmes identiques, font apparaître que la hauteur statique de garnissage n'a pas d'effet notable sur l'expansion du lit. Ce qui confirme les résultats de Tichy et Douglas [60].

IV.2.5. Comparaison des résultats expérimentaux

Nous avons estimé l'expansion du lit à l'aide de deux types d'équation:

- les équations de Tichy et Douglas [60], et Khanna [29] qui sont empiriques et ne nécessitent pas la connaissance préalable des rétentions de gaz et de liquide;
- les équations de O'Neil [51], et Vunjak-Novakovic [68], basées sur l'influence des rétentions de gaz et de liquide sur l'expansion du lit.

Dans le cas de l'équation de Vunjak-Novakovic [68], nous avons estimé la rétention de gaz par la relation de Kito [31] et la rétention liquide à partir des corrélations de Vunjak-Novakovic [67], Handl [27], Akselrod et Yakovenko [1], et Gel'perin [21].

Les figures 66 à 69 représentent la comparaison des valeurs expérimentales pour un système donné avec les valeurs calculées à partir des équations et corrélations de différents auteurs.

Il apparaît d'après les figures 66 à 69, que les relations de Tichy et Douglas [60] et Khanna [29], prédisent, le mieux, l'expansion du lit.

La relation de O'Neil [51], surestime l'expansion aux faibles flux de gaz et la sur-estime aux flux de gaz plus grands.

L'équation de Vunjak-Novakovic sur-estime en général l'expansion du lit, quelque soient les corrélations utilisées, pour calculer les rétentions de gaz et de liquide.

Cette sur-estimation serait due à une à une sur-évaluation de la rétention de gaz par l'équation de Kito [31]

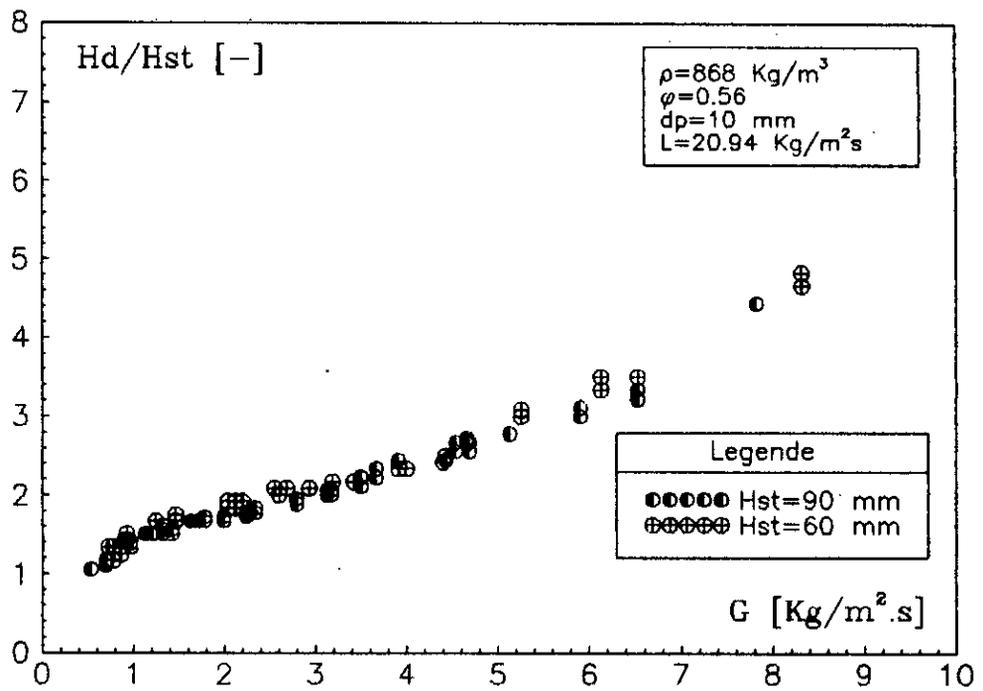


Figure 62 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
 Effet de l'aire libre de la grille support

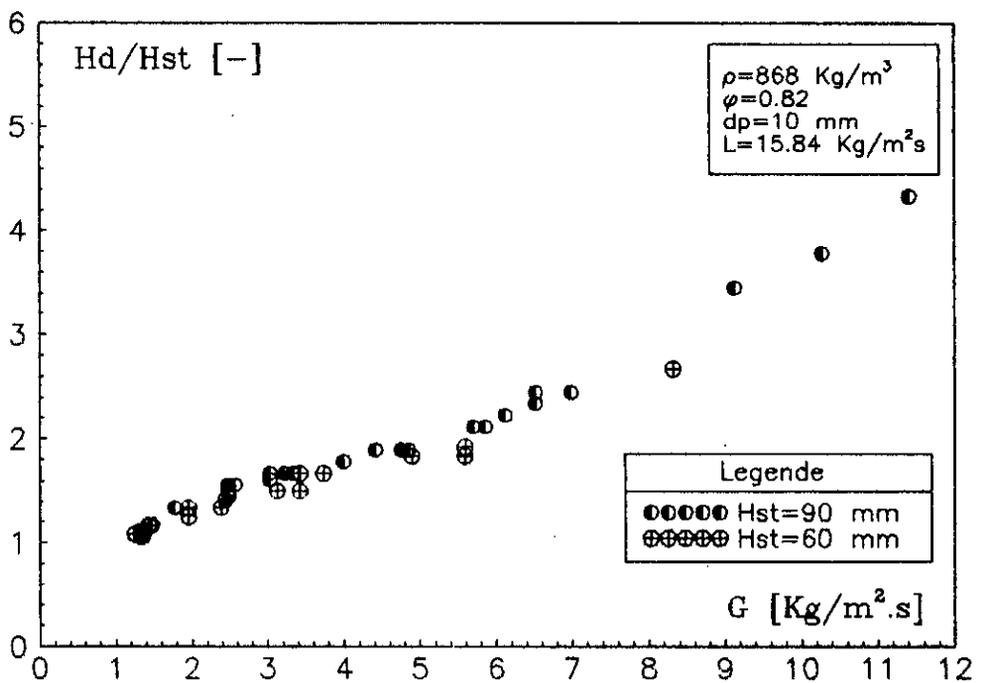


Figure 63 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
 Effet de l'aire libre de la grille support

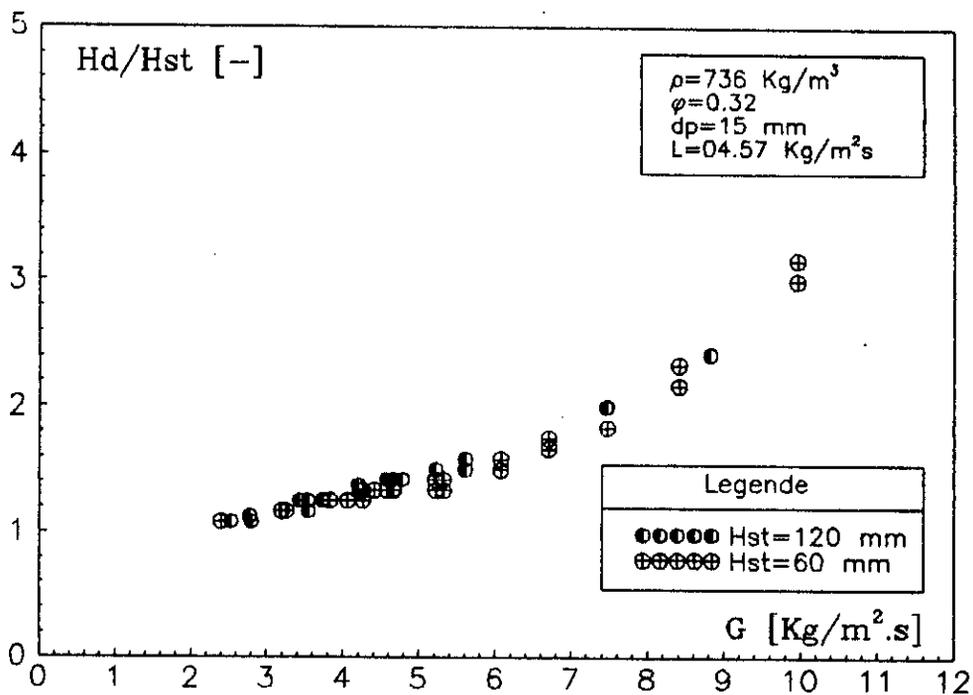


Figure 64 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support

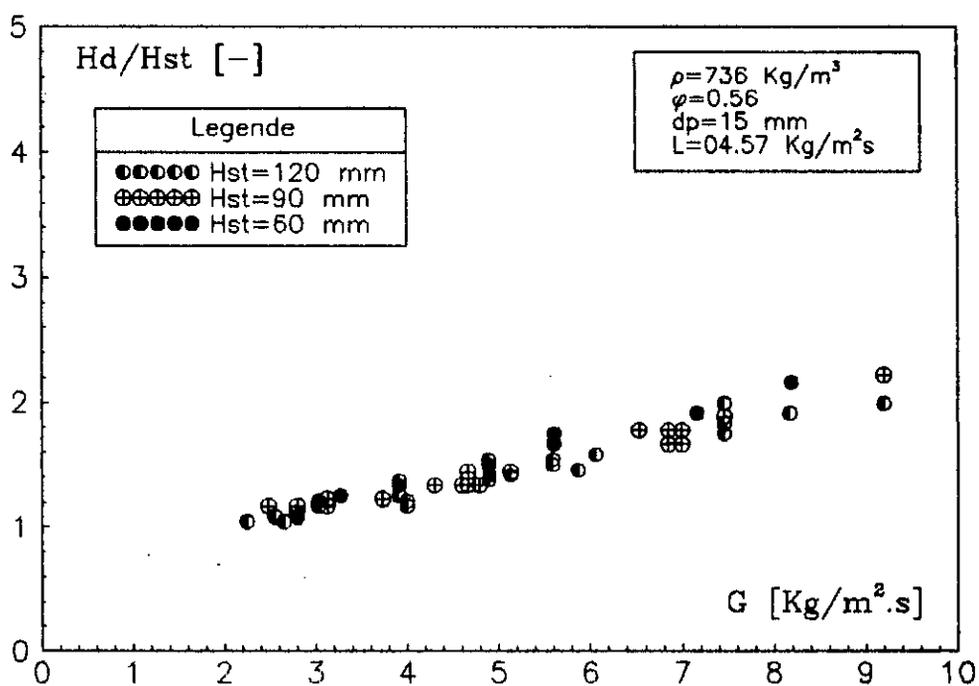


Figure 65 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
Effet de l'aire libre de la grille support

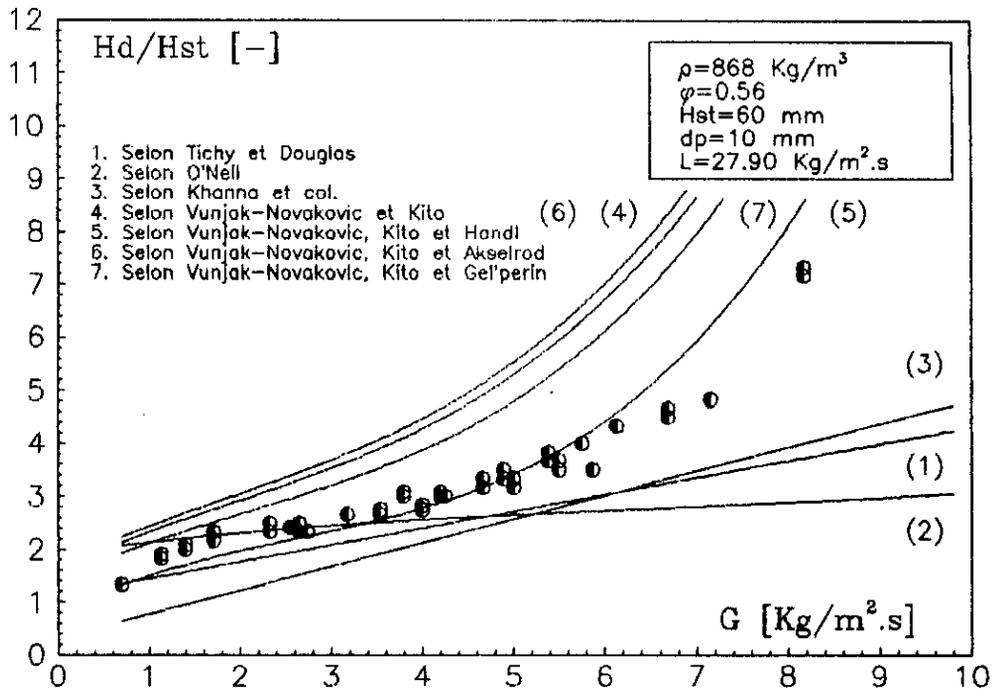


Figure 66 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

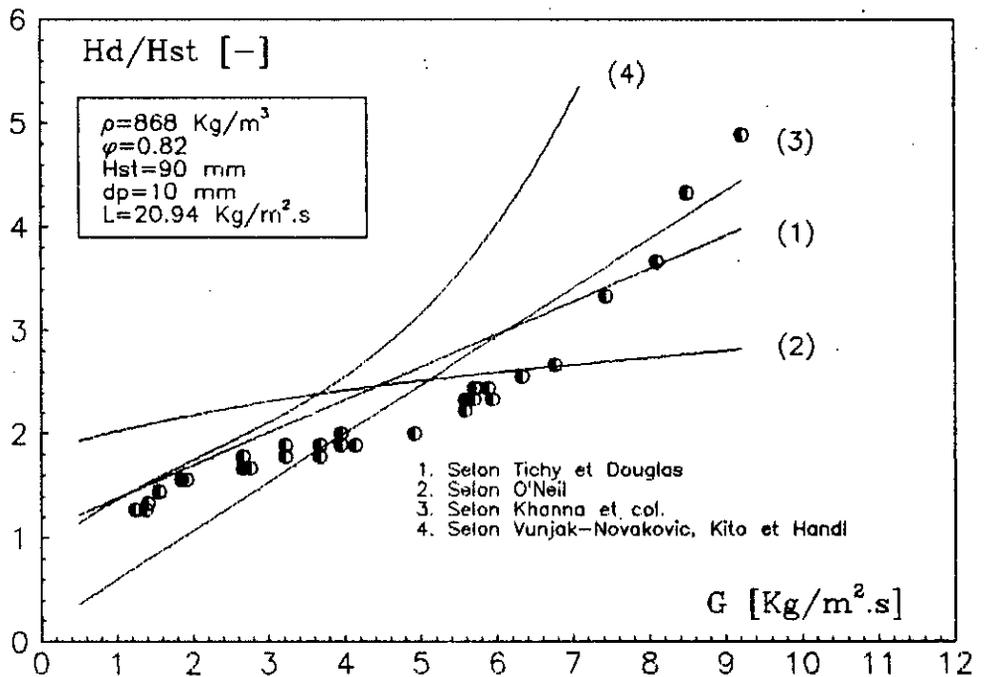


Figure 67 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

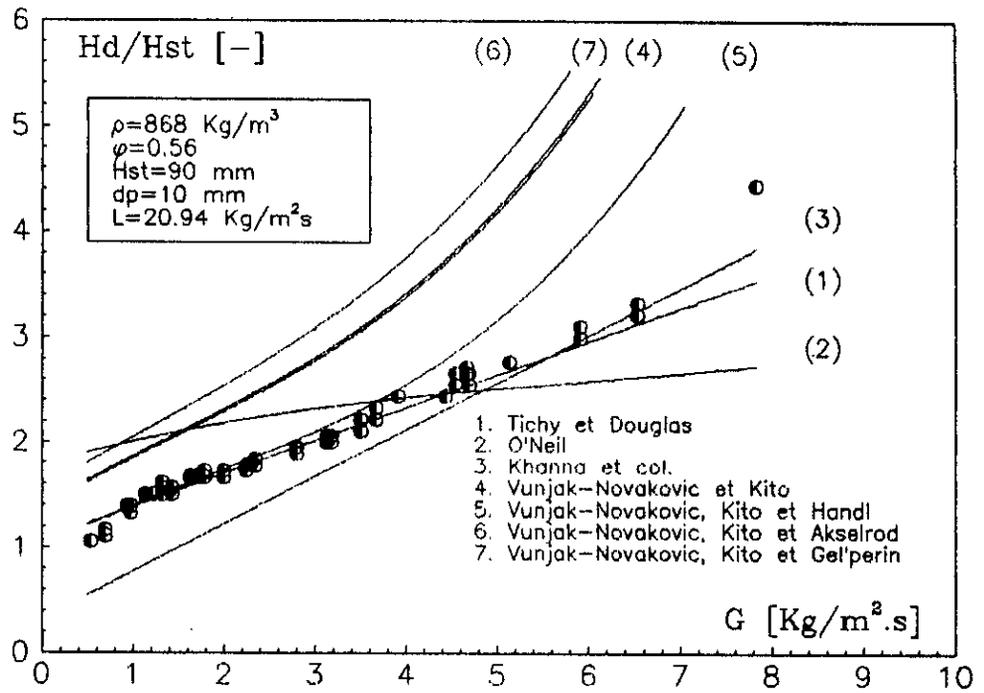


Figure 68 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

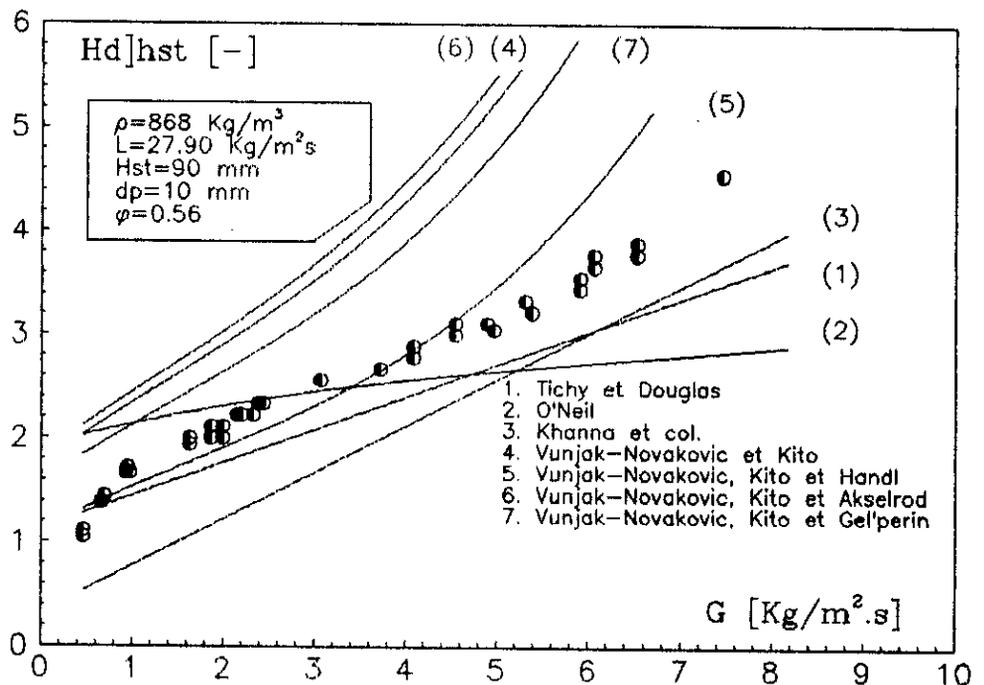


Figure 69 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les estimations de différents auteurs

IV.2.6. Estimation de l'expansion du lit

La prédiction de l'expansion du lit dépend principalement de l'estimation de la rétention du gaz (ε_g) et de la rétention liquide ($\varepsilon_{l,st}$), ainsi que de la géométrie de la grille support de garnissage.

Les corrélations empiriques proposées par certains auteurs sont valables uniquement pour des conditions expérimentales particulières et ont donc d'un usage assez restreint. Les relations basées sur des modèles hydrodynamiques, et notamment celle de O'Neil et col. [50] et Vunjak-Novakovic [68] sont plus générales.

Pour le type "ILACT", l'expansion du lit peut être estimée par les relations suivantes:

1) d'après Vunjak-Novakovic [68]:

$$\frac{Hd}{Hst} = \frac{(1-\varepsilon_0) + \varepsilon_{l,st}}{1-\varepsilon_g} \quad (IV.11)$$

dans cette relation il y a lieu d'utiliser les relations appropriés pour estimer la rétention liquide et la rétention de gaz selon que l'on soit dans le domaine de fluidisation partielle ou de fluidisation développée.

-Estimation de la rétention de gaz (ε_g):

-dans le domaine de fluidisation partielle, la vitesse interstitielle du gaz Ug' (définie comme étant $\left(\frac{Ug}{\varepsilon_g}\right)$) est constante et est égale à Ug' au point d'engorgement du lit

fixe et peut être estimée par la relation :

$$ug' = \left(\frac{UgF}{\varepsilon_g}\right) = \left(\frac{Ugm_f}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{l,st}}\right) \quad (IV.12)$$

d'où:

$$\varepsilon_g = \left(\frac{Ug}{Ugm_f}\right) [\varepsilon_0 - \varepsilon_{l,st}] \quad (IV.13)$$

où UgF représente la vitesse d'engorgement du lit fixe correspondant.

-dans le domaine de fluidisation développée la rétention du gaz est estimée à partir de la relation de Vunjak-Novakovic [67] :

$$\varepsilon_g = 0.628 U_g^{0.237} \quad (IV.14)$$

ou à partir de la relation de Gel' perin [21] :

$$\varepsilon_g = 0.93 \left[\frac{d_p U_g^* \rho_g}{\mu_g} \right]^{0.4} \left[\frac{d_p^3 (\rho_p - \rho_g) \rho_g}{\mu_g^2} \right]^{-0.2} \quad (IV.15)$$

où:

$$U_g^* = \frac{U_g}{1 - \varepsilon_{lst}(H_{st}/H_d)} \quad (IV.16)$$

-Estimation de la rétention liquide:

-pour les domaines de fluidisation partielle et de fluidisation développée, la rétention liquide peut être estimée à partir de la relation:

$$\varepsilon_{lst} = 4.43 \cdot 10^{-3} d_p^{-0.494} L^{0.812} \left[\frac{\rho_p}{\rho_l} \right]^{0.090} \left[\frac{H_{st}}{D_c} \right]^{-0.433} + 0.02 \quad (IV.17)$$

2) d'après O'Neil et col. [51]:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} \quad (IV.18)$$

où: ε est la fraction de vide à l'état fluidisé, calculée comme suit:

$$\varepsilon = \{K[27+4K/108]^{1/2+K/2}\}^{1/3} - \{K[27+4K/108]^{1/2-K/2}\}^{1/3} \quad (IV.19)$$

et K est défini comme suit:

$$K = [U_g^{1/2} + U_l^{1/2} (\rho_l/\rho_g)^{1/4}] / [0.775 (gd_p \rho_l / 6\rho_g)^{1/4}] \quad (IV.20)$$

Les résultats montrent que l'expansion du lit dépend essentiellement du flux gazeux et liquide, qu'elle est fortement affectée par l'aire libre de la grille support de garnissage et qu'elle est indépendante de la hauteur statique du garnissage.

Les résultats ont également mis en évidence l'existence de trois zones de variation de l'expansion avec l'augmentation du flux gazeux. Les courbes font apparaître l'existence de deux points d'inflexion délimitant ces domaines:

- le domaine (I) est caractérisé par une rapide augmentation de l'expansion; correspondant probablement au début de fluidisation qui est caractérisé par une augmentation simultanée de la rétention du gaz et dans une moindre mesure de celle du liquide,

- le domaine (II) où l'augmentation de l'expansion avec le flux gazeux diminue. Ce domaine correspond à la zone de fluidisation développée caractérisée par une rétention liquide pratiquement constante, et c'est uniquement la rétention du gaz qui contribue à l'accroissement de l'expansion.

- le domaine (III), caractérisé par une rapide augmentation de l'expansion. Ceci étant dû au fait, que la vitesse du gaz s'approchant de la vitesse d'engorgement, une quantité de liquide est entraînée par le courant gazeux augmentant ainsi la rétention liquide, et favorisant donc l'expansion. Tichy et Douglas [60] signalèrent également que l'expansion du lit augmentait rapidement quand la vitesse du gaz s'approchait de la vitesse d'engorgement.

En définitive, il apparaît donc, que la variation de l'expansion du lit est essentiellement gouvernée par la variation de la rétention du gaz et celle du liquide, laquelle est affectée à son tour par l'ouverture de la grille support de garnissage.

IV.3. Vitesse minimum de fluidisation

Nous avons déterminé la vitesse minimum de fluidisation définie, comme l'intersection des droites caractérisant le lit fixe et le lit entièrement fluidisé sur les courbes représentant les pertes de charge (Δp) en fonction du flux gazeux .

IV.3.1 Effet du flux liquide sur la vitesse minimum de fluidisation

Les figures 70 à 73 représentent l'évolution de la vitesse minimum de fluidisation, pour différents débits liquides, et pour des systèmes représentant les différentes conditions expérimentales.

Les résultats expérimentaux font apparaître que la vitesse minimum de fluidisation décroît quand le flux liquide augmente. Cette propriété peut être expliquée, pour le type II.ACT, (Fluidisation avec engorgement naissant), en considérant que la vitesse minimum de fluidisation, représente en fait, la vitesse d'engorgement du lit fixe, qui dépend à son tour du débits des courants gazeux et liquide et qui décroît avec l'augmentation du flux liquide.

IV.3.2. Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage.

Les résultats expérimentaux présentés sur les figures 74 à 77 représentant l'évolution de la vitesse minimum de fluidisation en fonction de l'arrosage liquide, pour des grilles support de différentes ouvertures, font apparaître que lorsque l'aire libre de la grille support décroît, la vitesse minimum de fluidisation diminue. Ceci confirme les résultats de Gel'perin et col. [21], Balabékov et col. [3], Kito et col. [34].

D'autre part, pour les valeurs de $\varphi = 0,56$ et $0,82$, la vitesse minimum de fluidisation devient pratiquement identique, ce qui confirme les résultats de Kito et col. [34], prédisant cet effet lorsque le paramètre $\frac{\varphi \cdot d}{D_c}$ devient supérieure à $0,005$.

L'influence de l'aire libre de la grille support de garnissage sur la vitesse minimum de fluidisation, peut être interprétée de la manière suivante: lorsque l'aire libre de la grille support diminue, l'écoulement du courant liquide est ralenti, ce qui engendre une accumulation de liquide près de la grille support qui est ensuite refoulé par le courant gazeux en tête de colonne, initiant ainsi l'engorgement du lit fixe c'est à dire le début de fluidisation du lit mobile. Cette limite est d'autant plus basse, que la section de passage du liquide est plus petite.

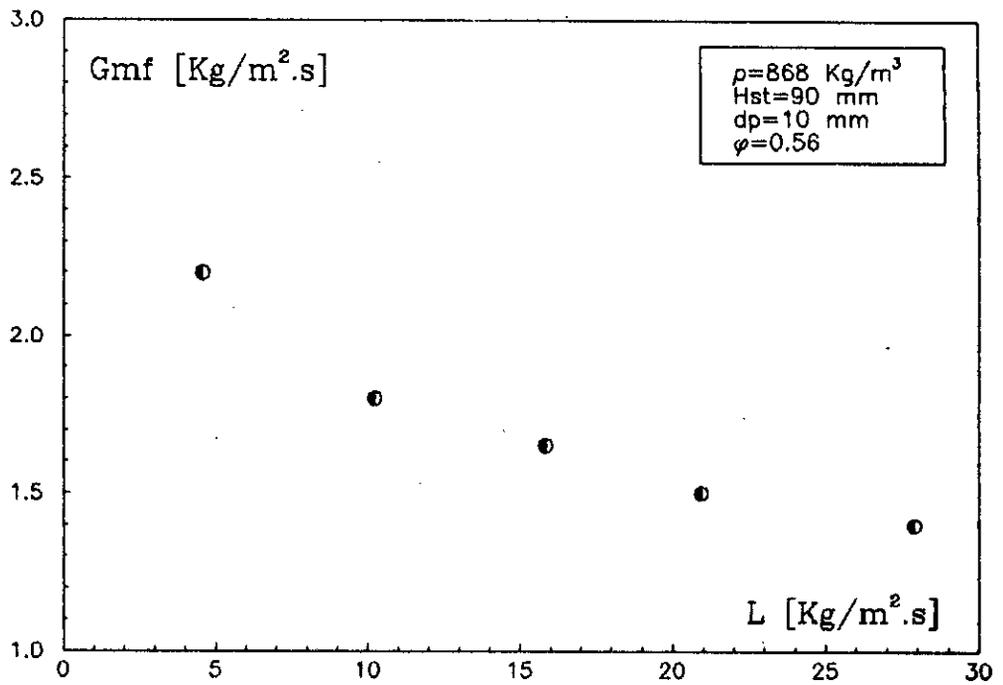


Figure 70 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide

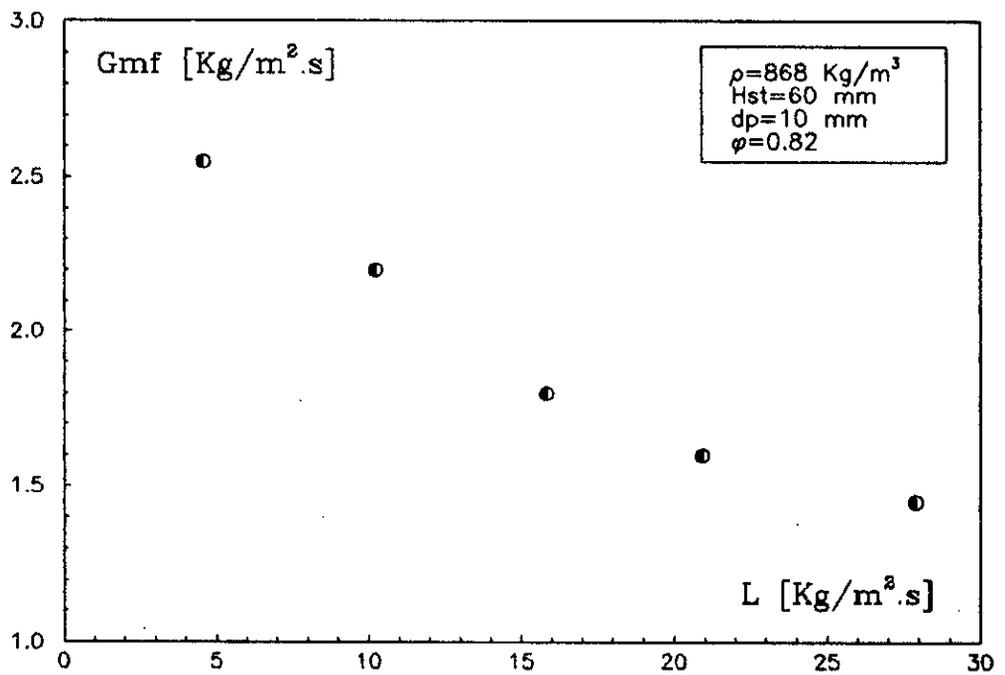


Figure 71 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide

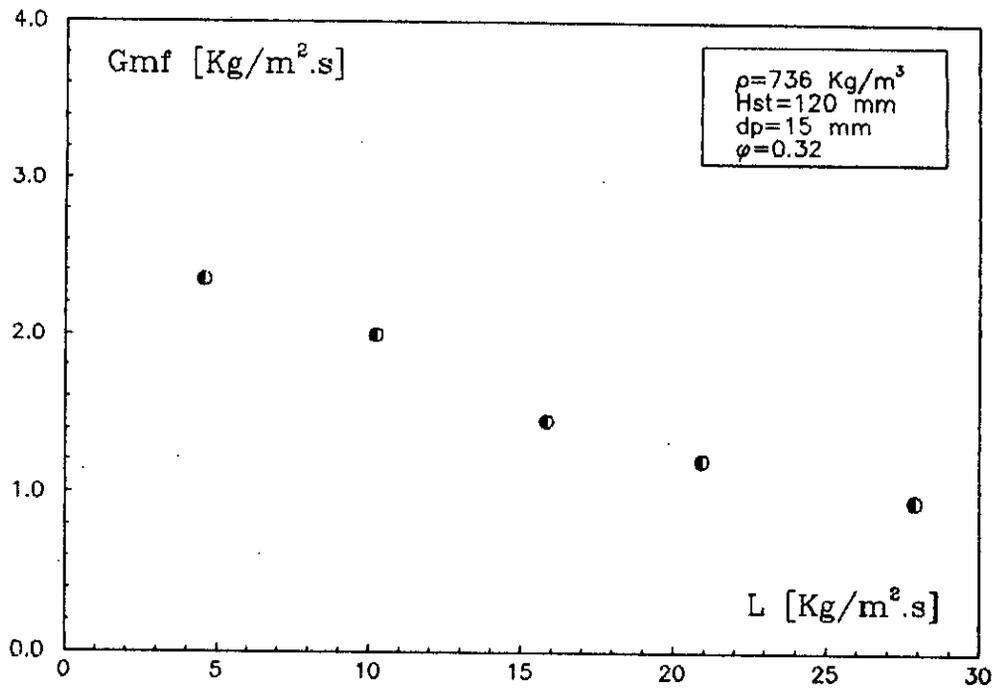


Figure 72 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide

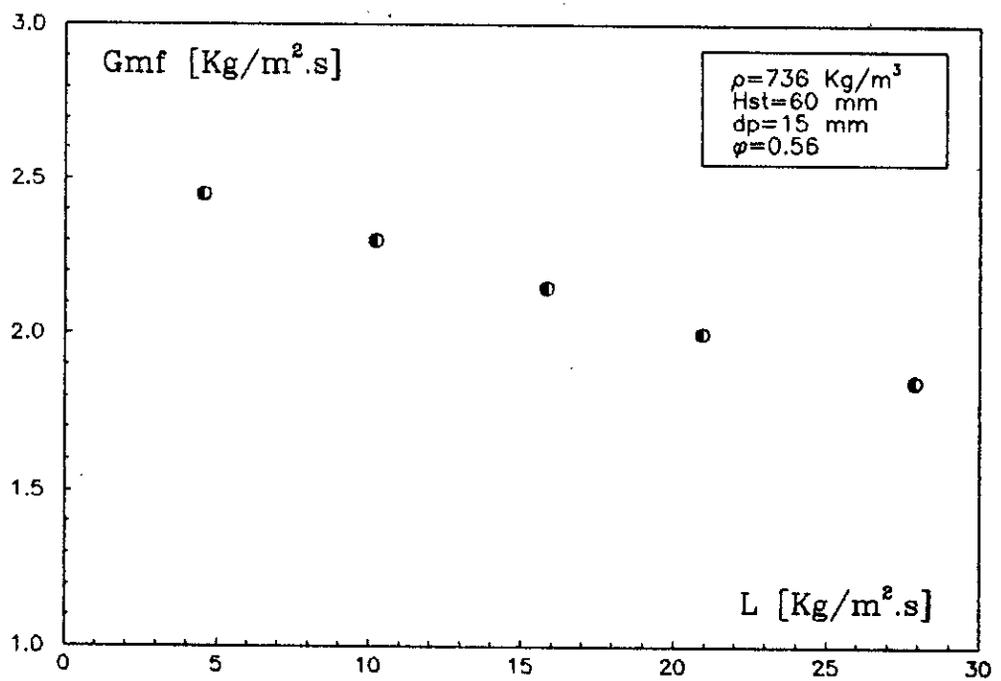


Figure 73 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide

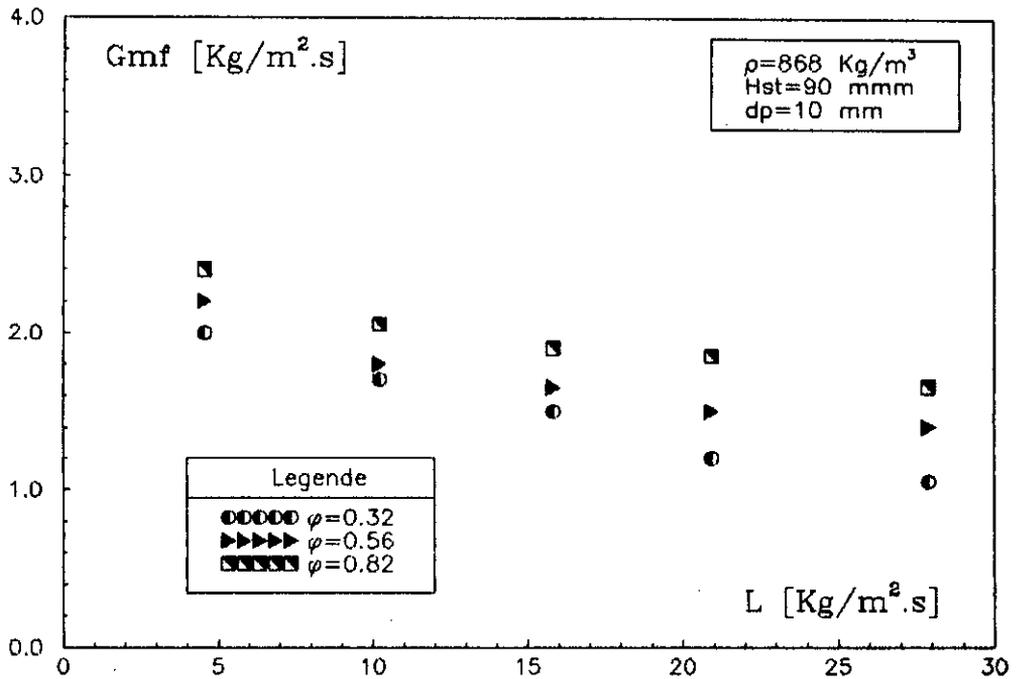


Figure 74 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

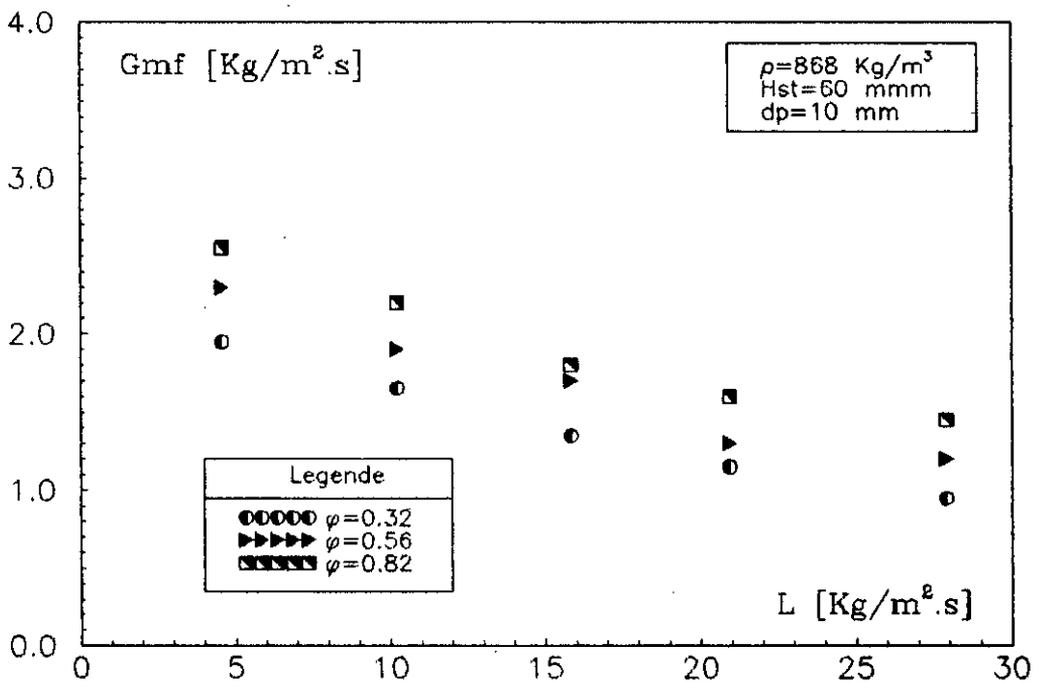


Figure 75 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

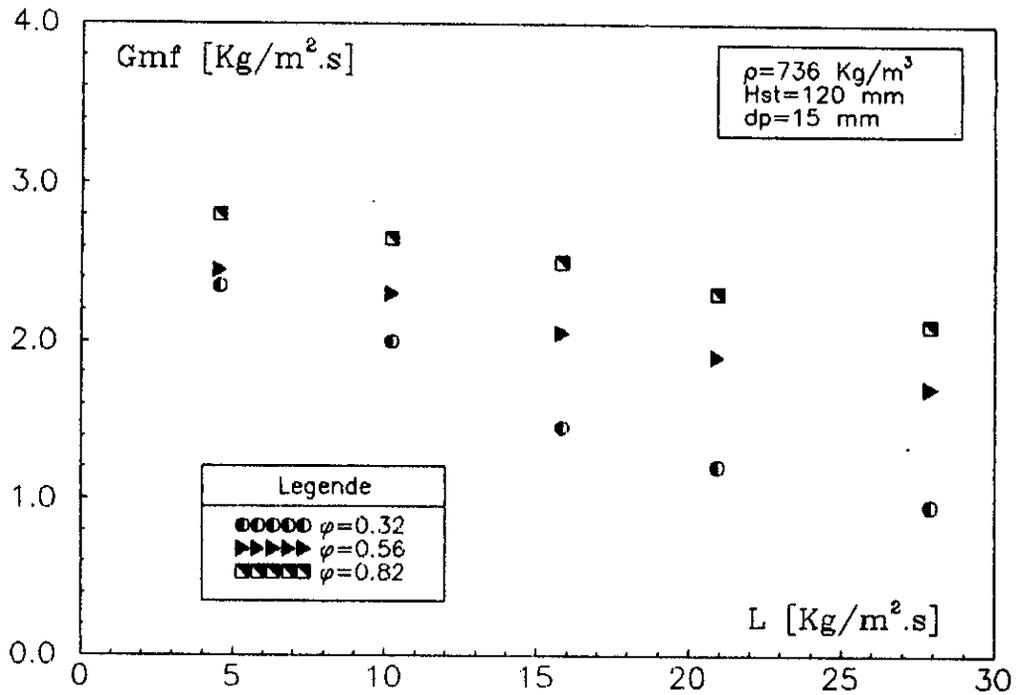


Figure 76 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

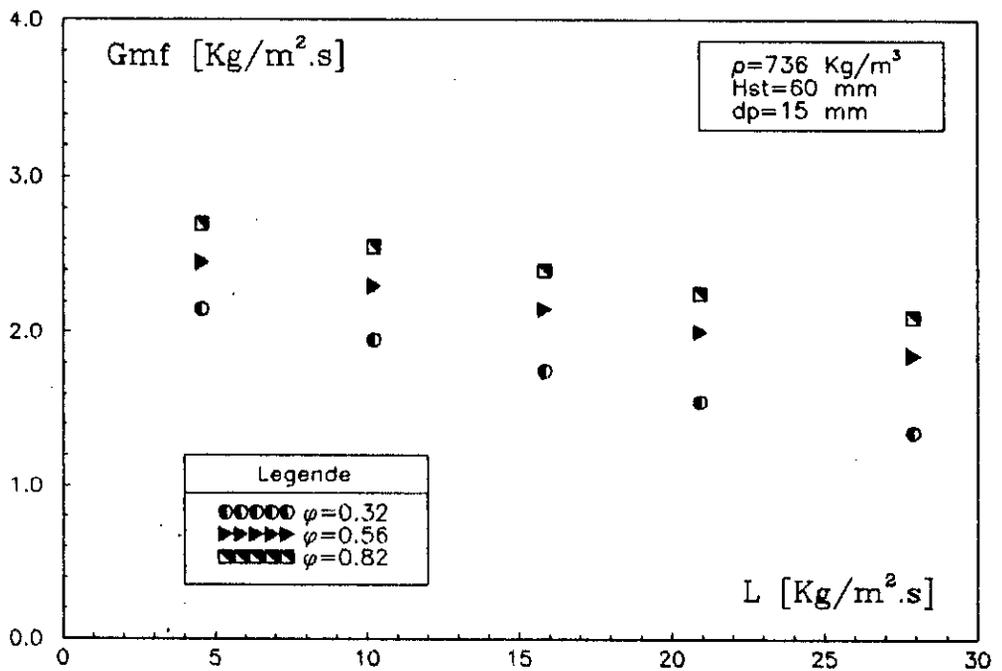


Figure 77 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage

IV.3.3. Effet des dimensions des particules de garnissage

Nous avons examiné l'effet du diamètre des particules pour deux garnissages, de masse volumique différente ($\rho_{p1}=868 \text{ Kg/m}^3$ et $\rho_{p2}=736 \text{ Kg/m}^3$), néanmoins, la différence des masses volumiques n'affectera pas la comparaison des vitesses minimum de fluidisation, si l'on admet que la vitesse d'engorgement du lit fixe, qui détermine la vitesse minimum de fluidisation, ne dépend pas de la densité du garnissage.

Les figures 78 à 81 illustrant la variation de la vitesse minimum de fluidisation avec l'arrosage liquide, pour des garnissages de dimensions différentes, font apparaître, qu'avec l'augmentation du diamètre des particules, la vitesse minimum de fluidisation augmente. Ces résultats sont analogues à ceux de Chen et Douglas [10], Kito et col. [34], Vunjak-Novakovic [68], Kuroda et Tabei [41].

Lorsque le diamètre des particules sphériques diminue, la fraction de vide de la couche solide diminue, c'est à dire que la section libre offerte au passage des courants liquide et gazeux diminue, ce qui favorise l'engorgement du lit fixe et donc la vitesse minimum de fluidisation du lit mobile.

VI.3.4. Estimation de la vitesse minimum de fluidisation

L'estimation de la vitesse minimum de fluidisation pour l'Absorbeur à Contact Turbulent, dépend du mode de fluidisation envisagé.

Pour le mode de fluidisation type "I.A.C.T.", la vitesse minimum de fluidisation du lit est représentée par la vitesse d'engorgement du lit fixe correspondant, et par conséquent la vitesse minimum de fluidisation sera estimée sur cette base.

Vunjak-Novakovic propose l'équation suivante:

$$\log_{10} \left[\frac{U_{gmfd}^2}{g} \frac{\rho_p}{e^3} \frac{\rho_g}{\rho_l} \right] = 0,247 - 1,615 \left[\frac{L}{G_{mf}} \right]^{0,25} \left[\frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{0,125} \quad (\text{IV.21})$$

Pour déterminer la vitesse minimum de fluidisation du lit entièrement fluidisé (U_{gmfd}), le même auteur propose l'équation:

$$U_{gmfd} = 0,545 \left[\frac{U_{gmfd}}{e\alpha - e_{l,st}} \right] \quad (\text{IV.22})$$

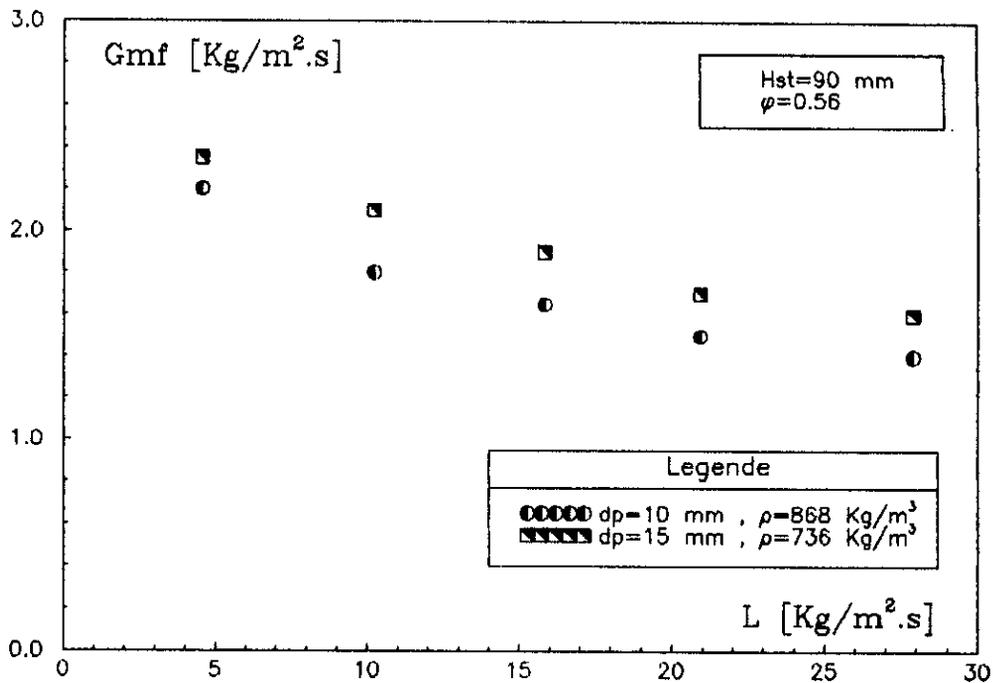


Figure 78 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet des dimensions du garnissage

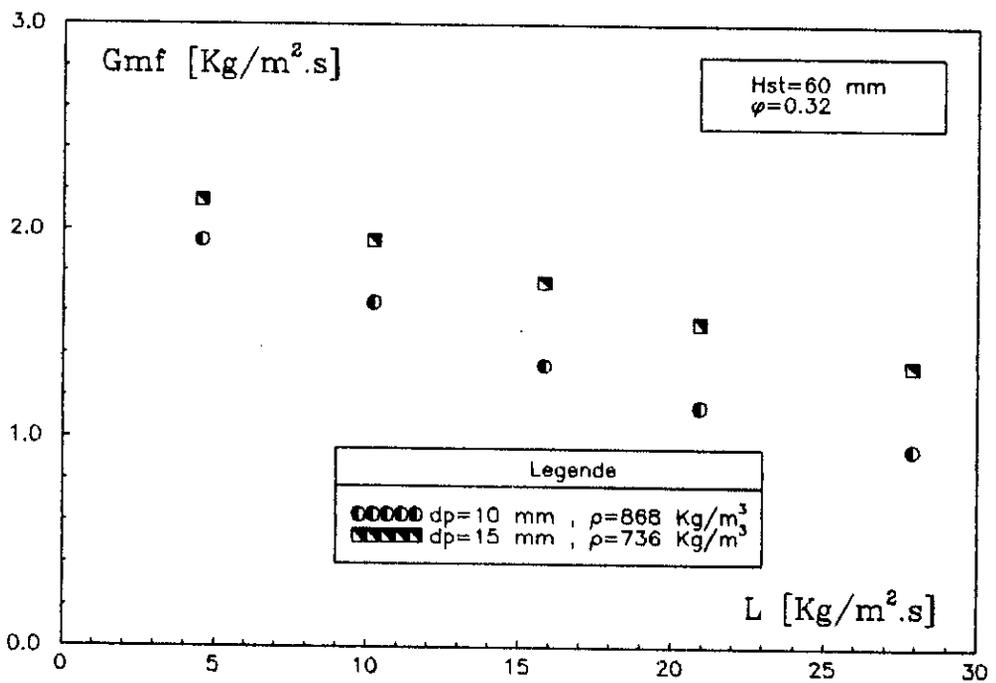


Figure 79 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet des dimensions du garnissage

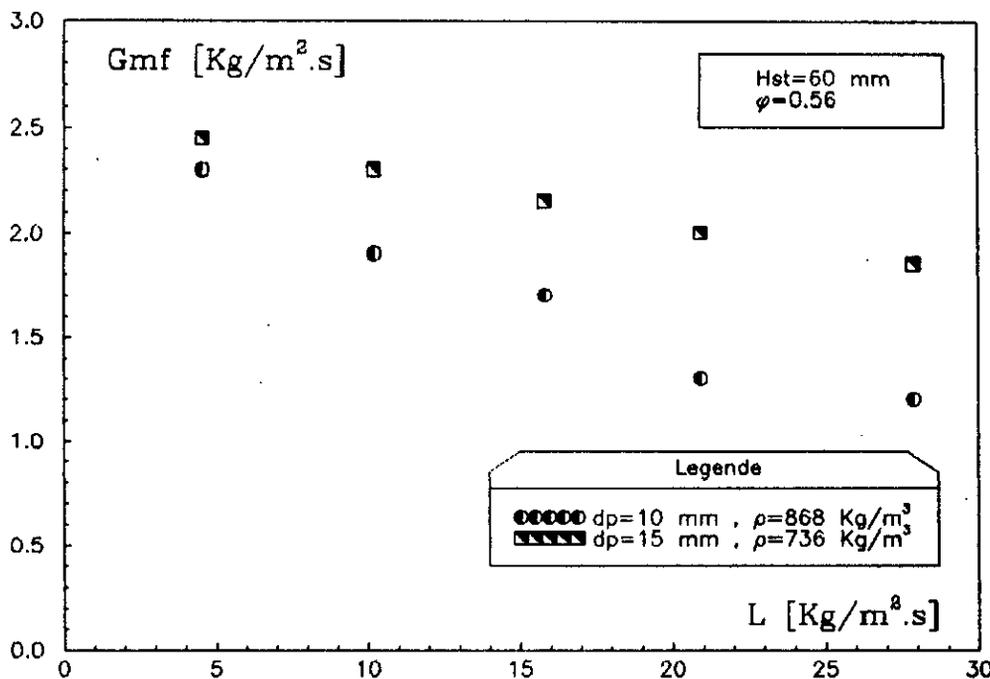


Figure 80 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet des dimensions du garnissage

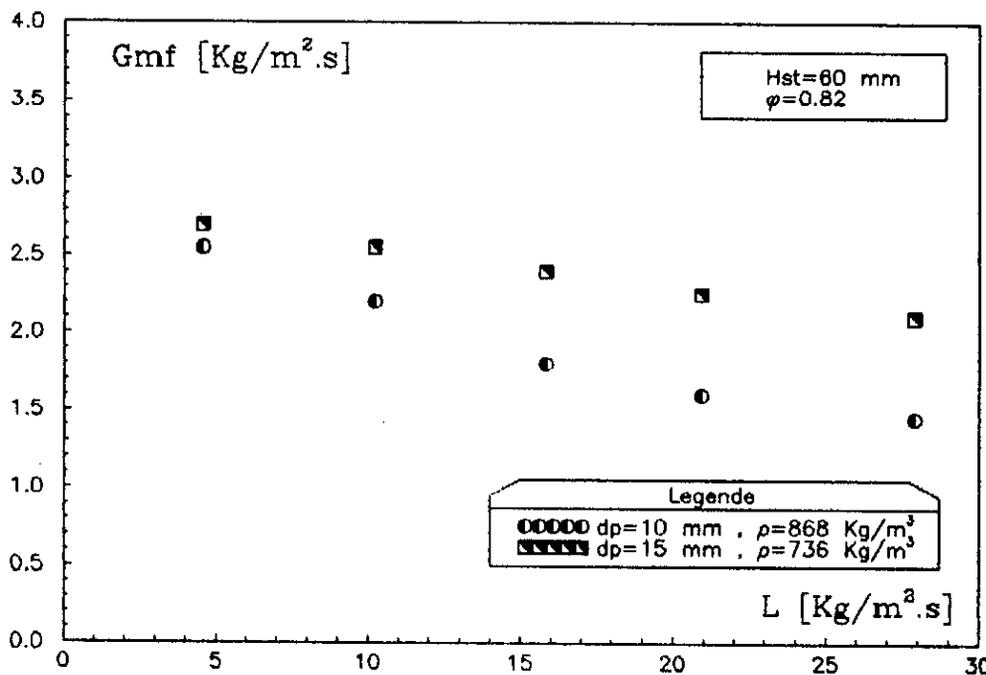


Figure 81 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide :
Effet des dimensions du garnissage

Kuroda et Tabei [41], proposèrent une équation basée sur leur modèle :

$$C_{fi} \left(\frac{\rho_g U_{g_{mf}}^2}{d_p} \right) = (\rho_{ws} - \rho_g) g \quad (\text{IV.23})$$

l'inconvénient de cette méthode est qu'il faut au préalable connaître la rétention liquide au minimum de fluidisation.

Les résultats expérimentaux font apparaître que la vitesse minimum de fluidisation décroît avec l'augmentation du flux liquide. Ces résultats ont été également relevés par Chen et Douglas [10], Kito et col. [33], Vunjak-Novakovic [68], et Kuroda Tabei [41].

L'aire libre de la grille support de garnissage affecte fortement la vitesse minimum de fluidisation: avec la diminution de l'aire libre de la grille support, la vitesse minimum de fluidisation diminue de manière appréciable, ceci a été noté pour les deux types de garnissage, par contre cet effet diminuait avec l'augmentation de la fraction de vide de la grille.

IV.4. Corrélations des paramètres hydrodynamiques

L'estimation d'un paramètre par une corrélation, déduite pour un système spécifique, présente en général certaines limites et sa généralisation à d'autres systèmes est aléatoire. Il convient donc de corréler nos résultats, par une corrélation spécifique au système étudié.

VI.4.1. Corrélation pour les pertes de charge

Nous avons utilisé l'équation générale des pertes de charge :

$$(-\Delta p) = [(1 - \varepsilon_0) \rho_p + \varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_g \rho_g] g H_{st} \quad (\text{VI.24})$$

qui fait apparaître que celles-ci sont la somme d'un terme statique et d'un terme dynamique:

- le terme statique $[(1-\varepsilon_0)\rho_p g H_{st}]$ qui représente le poids du garnissage;
- le terme dynamique $[(\varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_g \rho_g) g H_{st}]$ qui représente le poids du liquide et celui du gaz retenus dans le lit.

L'analyse des résultats expérimentaux a mis en évidence, que les pertes de charge sont affectées de manière significative par, le flux liquide (L), la géométrie du système représentée par l'aire libre de la grille support, le diamètre de la colonne et la hauteur statique (φ et H_{st}/D_c).

En conclusion, une équation en termes adimensionnels pour les pertes de charge, serait de la forme:

$$\frac{-\Delta p}{\rho_g U_g^2} = \frac{(1-\varepsilon_0)\rho_p g H_{st}}{\rho_g U_g^2} a_1 Re_g^{a_2} Re_l^{a_3} \left(\frac{H_{st}}{D_c}\right)^{a_4} \varphi^{a_5} \quad (\text{IV.25})$$

La régression linéaire par la méthode des moindres carrés de 1494 données expérimentales a abouti à la relation (IV.26):

$$(-\Delta p) = \left[\frac{(1-\varepsilon_0)\rho_p g H_{st} \rho_g}{G^2} 267.4933 \cdot 10^5 \left(\frac{d_p U_l \rho_l}{\mu_l}\right)^{-1.7946} \left(\frac{d_p U_l \rho_l}{\mu_l}\right)^{0.2511} \left(\frac{H_{st}}{D_c}\right)^{1.1891} \varphi^{-0.2361} \right] \frac{G^2}{\rho_g}$$

Nous avons présenté sur les figures 82 à 85 les résultats estimés par cette corrélation pour quelques exemples.

Les figures 86 à 89 montrent l'erreur, sur l'estimation des pertes de charge, à l'aide de notre corrélation et ceci pour le domaine de fluidisation totale où les pertes de charge sont pratiquement constantes.

IV.4.2. Corrélation de l'expansion du lit

La comparaison entre nos valeurs expérimentales et celles prévues par les corrélations de Tichy et Douglas [60], O'Neil [50], Khanna et col [29], Vunjak-Novakovic [68], présentées sur les figures 66 à 69 met en évidence, en général, les limites de ces corrélations. Il convient donc de proposer une corrélation spécifique au système étudié.

Nous avons tenté d'obtenir une corrélation basée sur l'expression de l'expansion (II.18) dans laquelle nous avons remplacé les termes représentant la rétention liquide et la rétention gazeuse par les corrélations de Vunjak-Novakovic [67], dont on a essayé de recalculer les coefficients. Cette méthode se révéla infructueuse.

Nous avons par la suite recalculé les coefficients de l'expression de Tichy et Douglas [60] pour nos valeurs et nous avons obtenu l'expression:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = -1.1569 + 0.3479 G - 0.0733 \cdot 10^{-2} dp + 0.6508 L^{0.6} dp^{0.5} + 3.5536 L^{0.5} dp^{-0.5} \quad (IV.27)$$

Cette corrélation donne des droites estimant assez bien l'allure générale de la variation de l'expansion, notamment avec la variation du flux liquide et l'aire libre de la grille support de garnissage. Par contre elle sous-estime nettement l'expansion aux basses valeurs du flux gazeux.

En définitive, nous avons essayé de déduire une corrélation basée sur:

-l'allure générale de l'expansion (H_d/H_{st} en fonction de G) qui s'apparente nettement à un polynôme du troisième degré. Ceci est valable et a été vérifié pour chaque système expérimental;

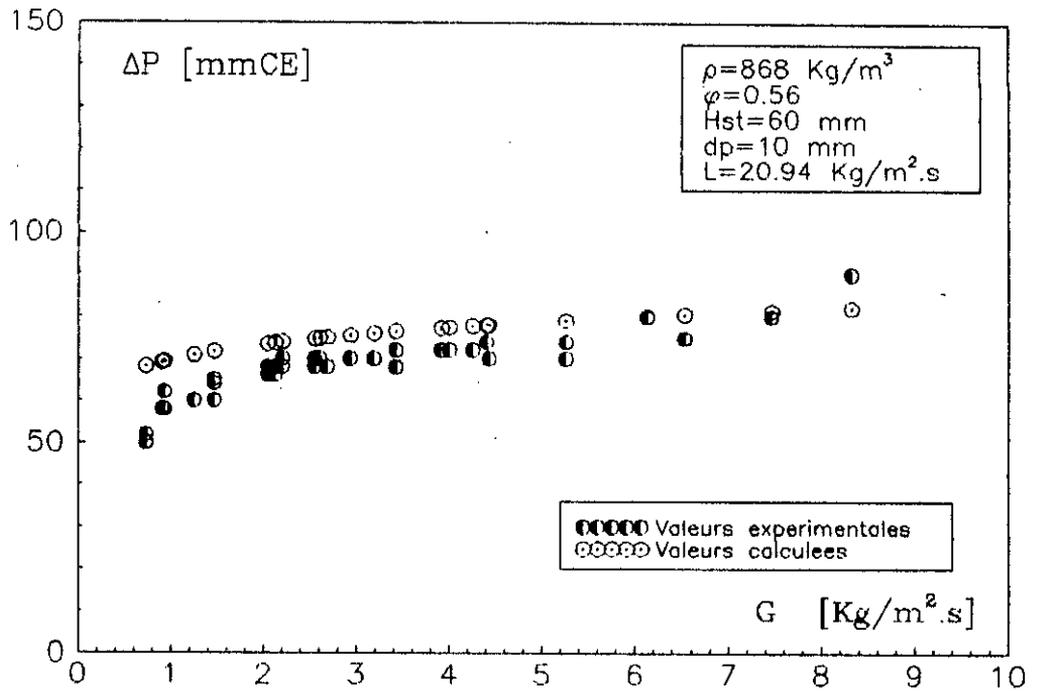


Figure 82 : Estimation des pertes de charge par corrélation

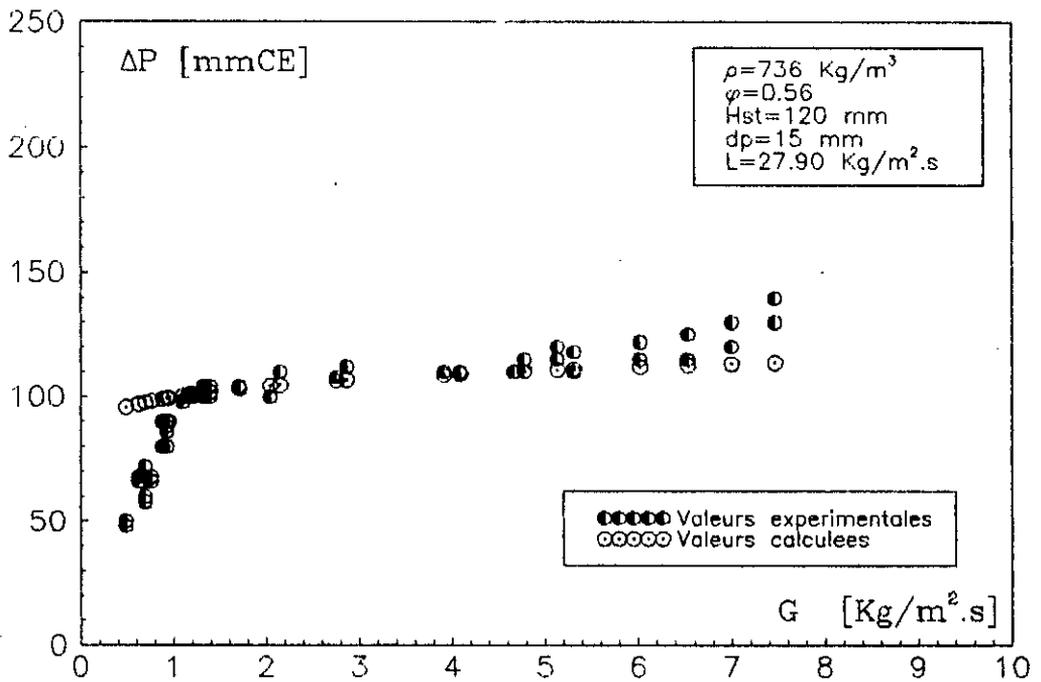


Figure 83 : Estimation des pertes de charge par corrélation

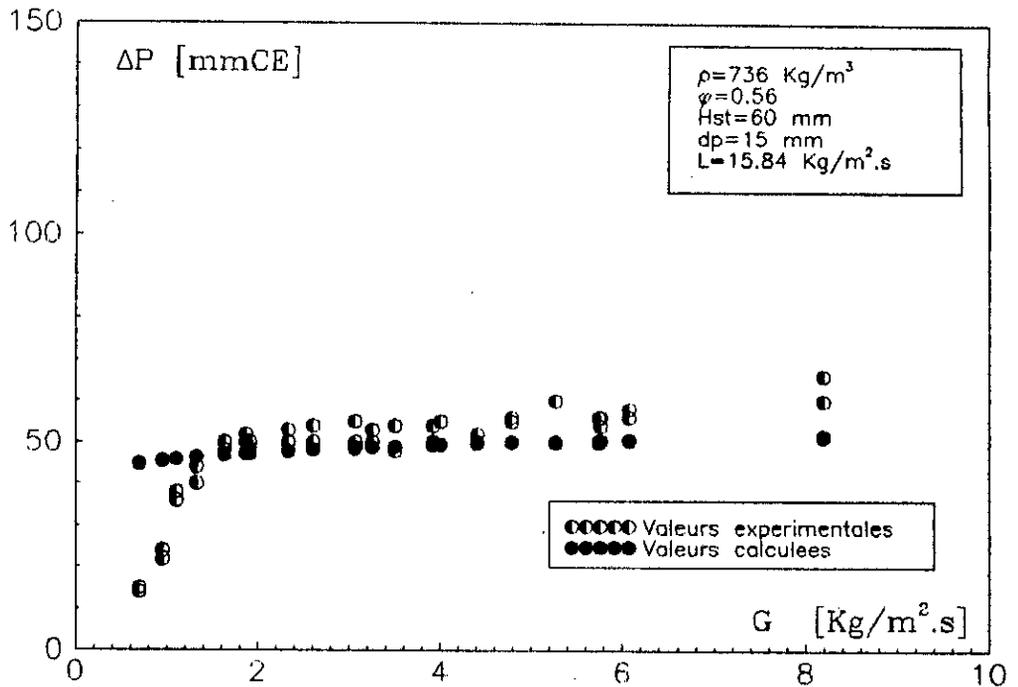


Figure 84 : Estimation des pertes de charge par corrélation:

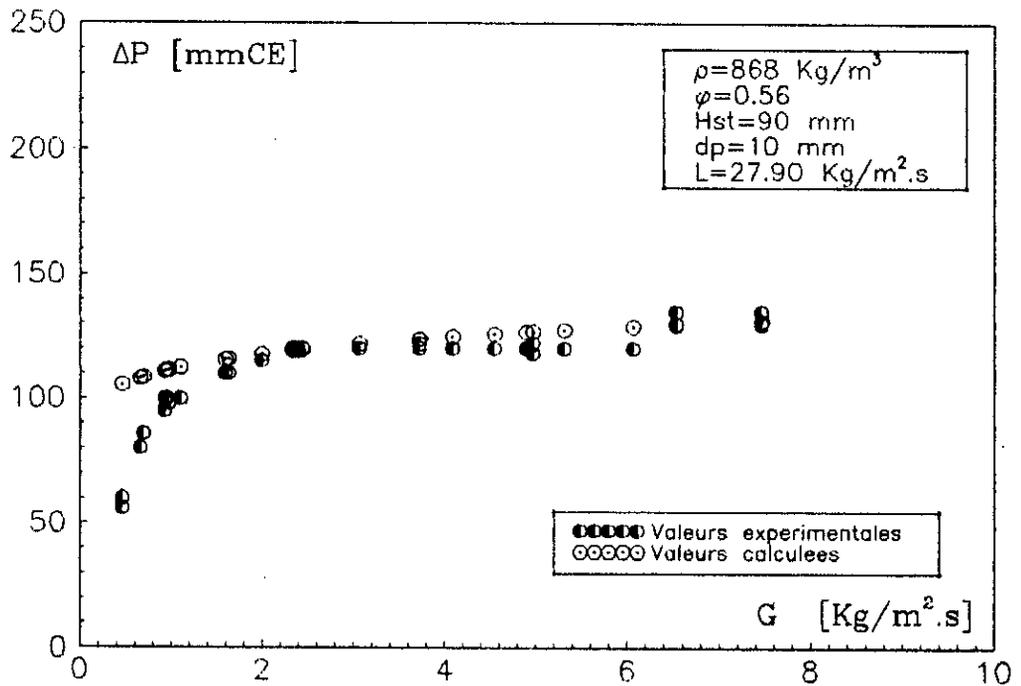


Figure 85 : Estimation des pertes de charge par corrélation

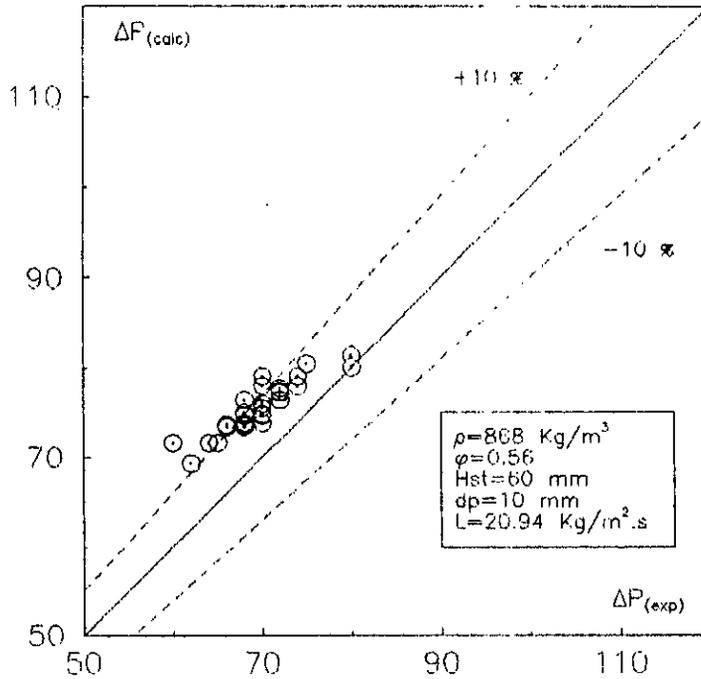


Figure 86 : Estimation des pertes de charge par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

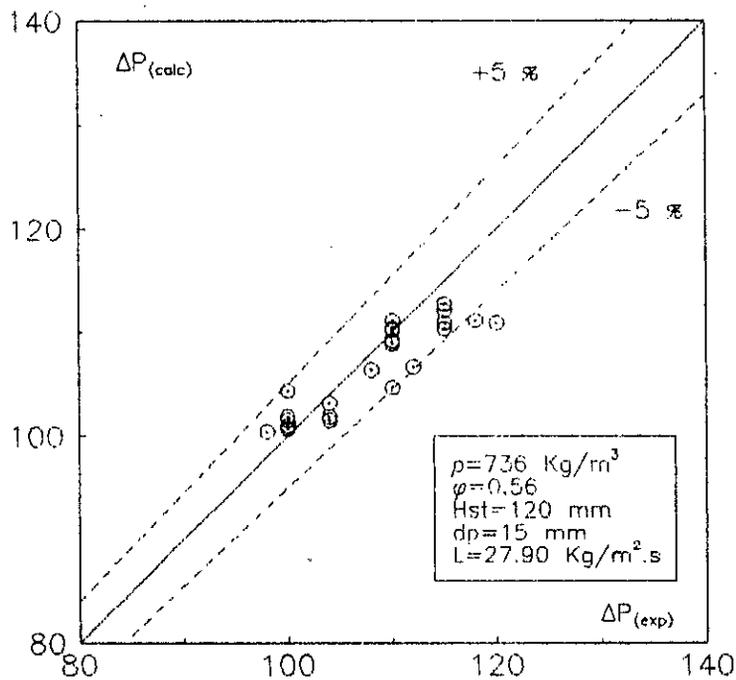


Figure 87 : Estimation des pertes de charge par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

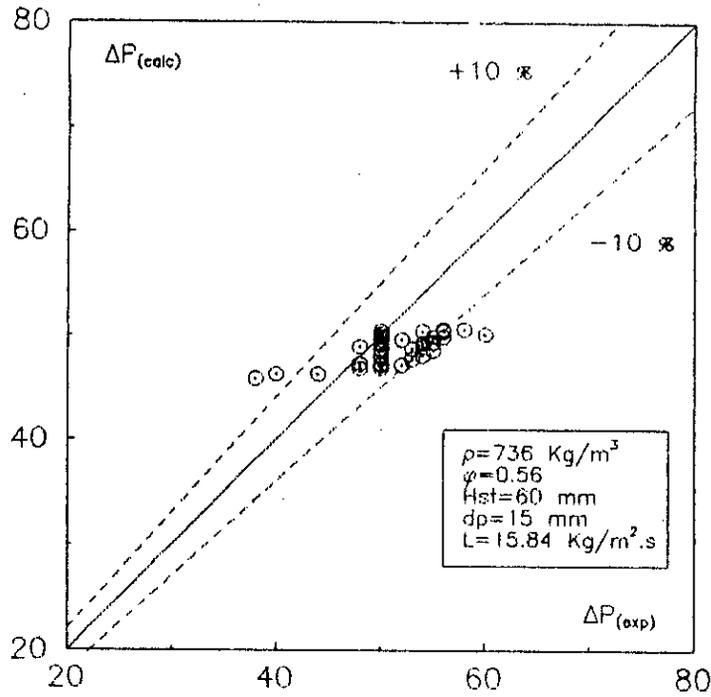


Figure 88 : Estimation des pertes de charge par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

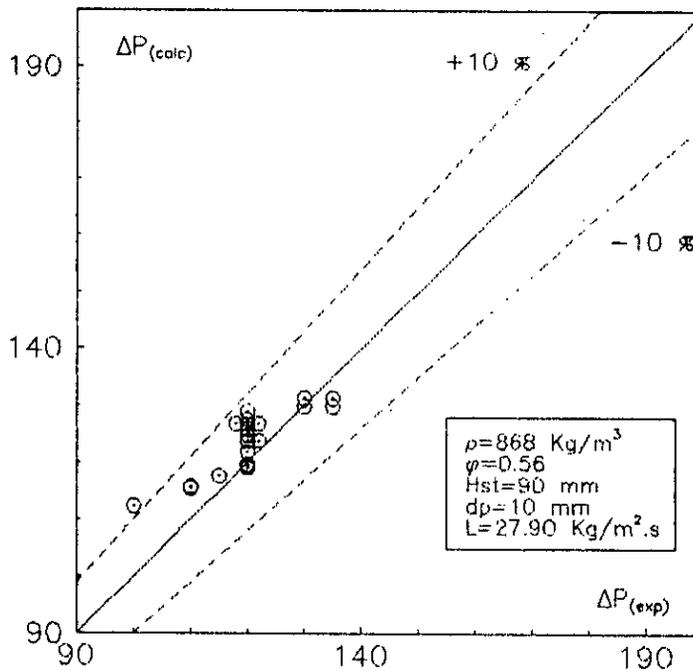


Figure 89 : Estimation des pertes de charge par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

-l'influence des paramètres significatifs: selon nos résultats, nous avons mis en évidence l'influence du flux liquide (L), et de l'aire libre de la grille support (ϕ), par contre aucun effet de la hauteur statique du garnissage (H_{st}) n'a été mis en évidence. D'autre part, Tichy et Douglas [60], ont mis en évidence que la masse volumique du garnissage (ρ_p) n'avait pas d'influence sur l'expansion du lit.

-l'expansion, pour un débit de gaz nul, est égale à l'unité ($\left. \frac{H_d}{H_{st}} \right|_{G=0} = 1$).

En fonction de ces considérations, la meilleure corrélation serait de la forme:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = 1 + [a_1 G + a_2 G^2 + a_3 G^3] \phi^{a_4} L^{a_5} \quad (IV.28)$$

Le modèle proposé étant non linéaire et non linéarisable analytiquement: nous avons utilisé la méthode itérative de Gauss-Newton. On obtient la corrélation (IV.29) par la régression de 1998 données expérimentales:

$$\frac{H_d}{H_{st}} = 1 + [4,0999 \cdot 10^{-3} G - 7,4031 \cdot 10^{-3} G^2 + 9,4272 \cdot 10^{-5} G^3] \phi^{-1,3700} L^{1,2200} \quad (IV.29)$$

Nous avons porté sur les figures 90 à 93 cette corrélation avec les points expérimentaux, pour quelques systèmes représentatifs.

Sur les figures 94 à 97, nous présentons la comparaison des valeurs estimées et expérimentales, et les marges d'erreur.

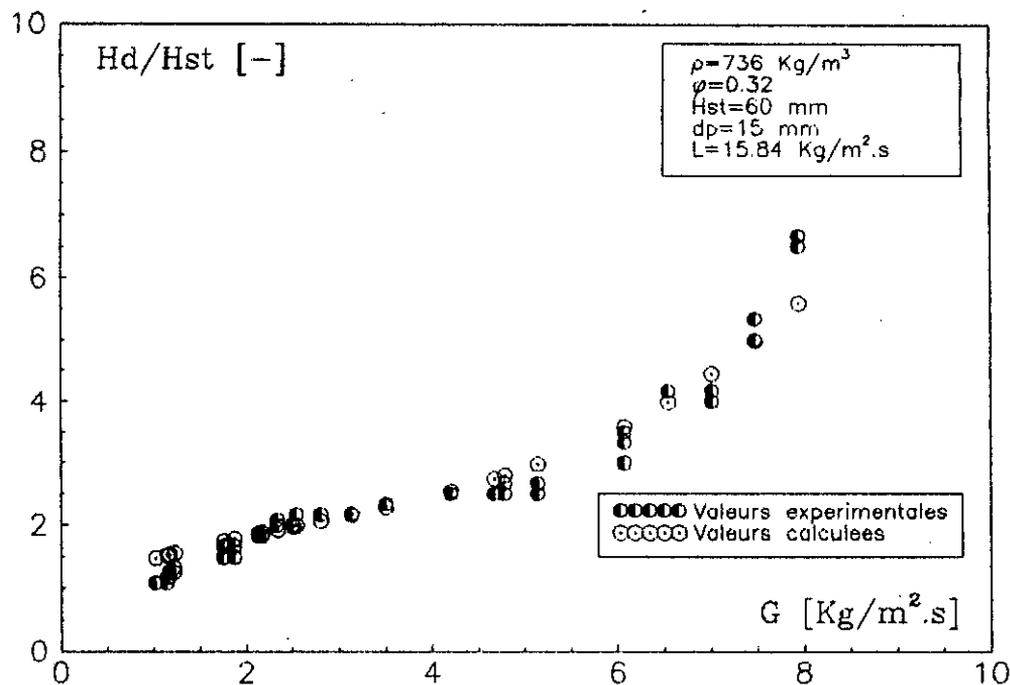


Figure 90 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation

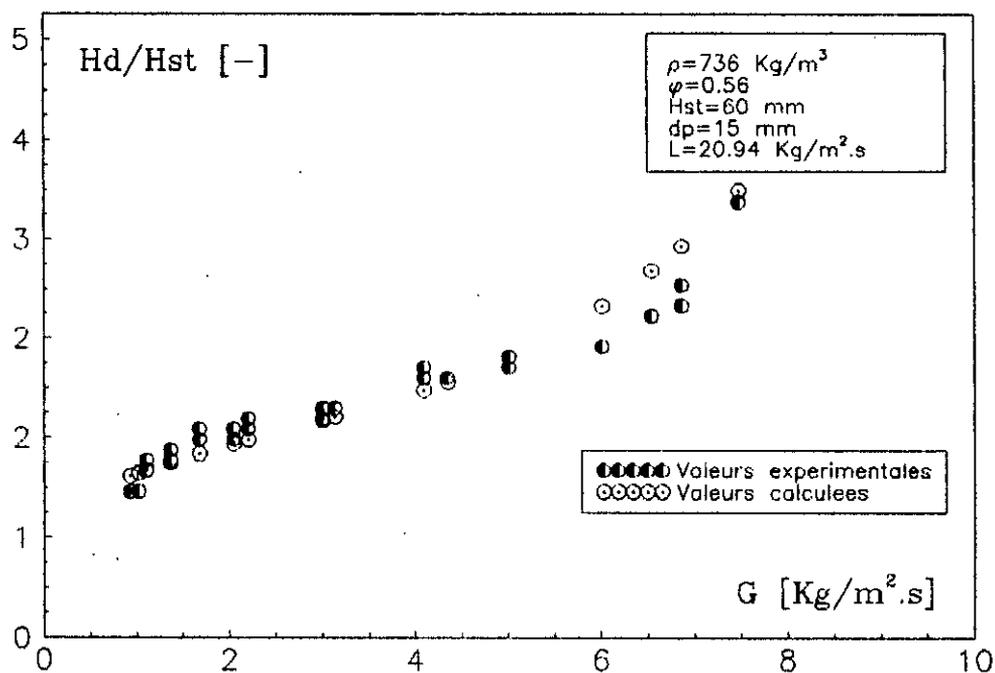


Figure 91 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation

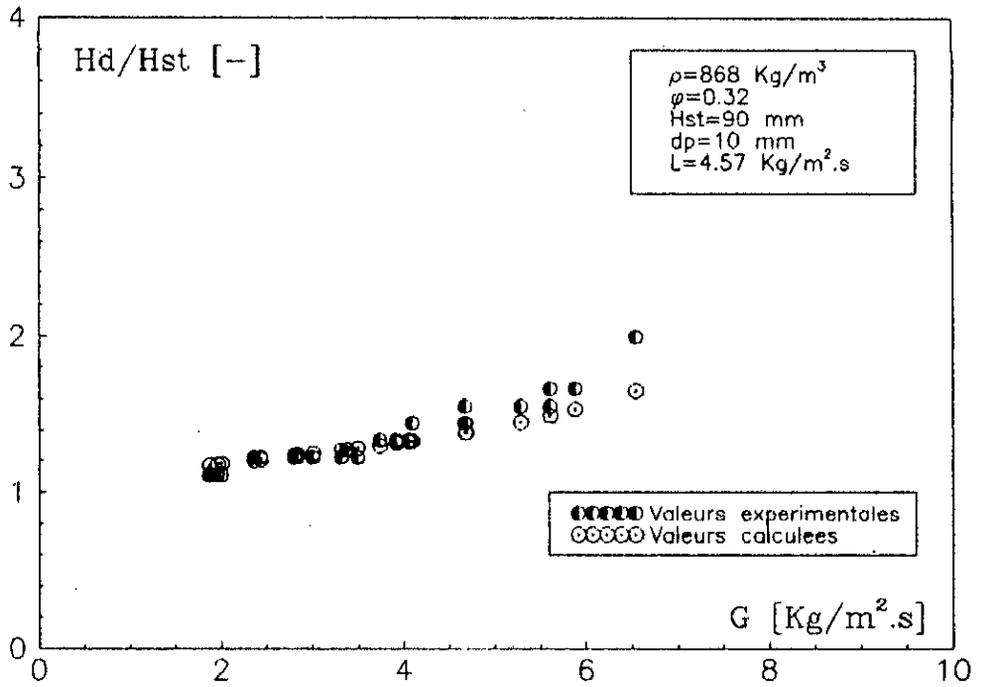


Figure 92 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation

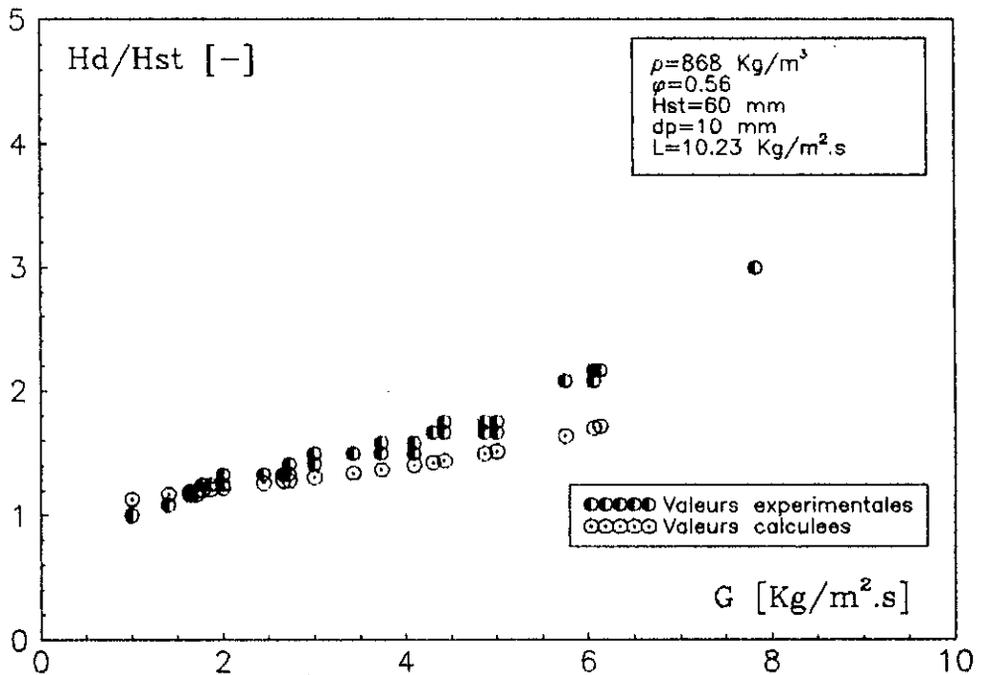


Figure 93 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation

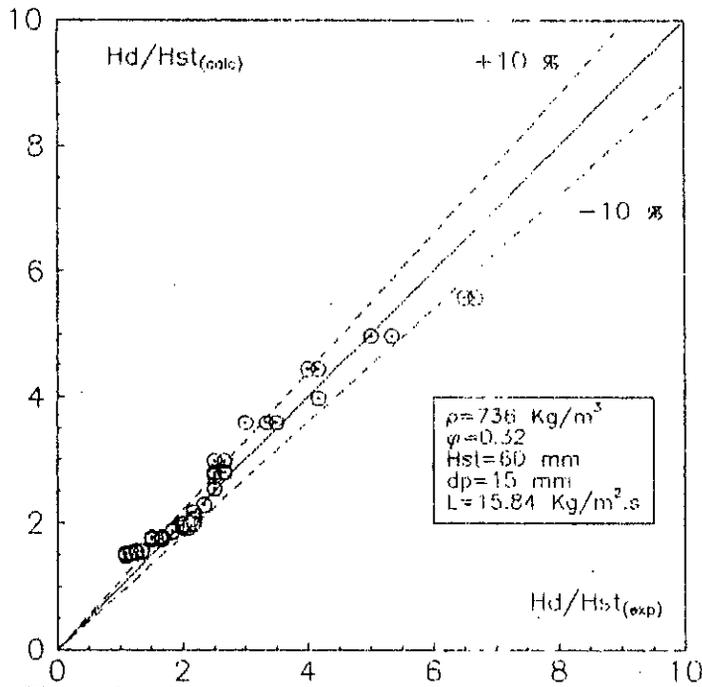


Figure 94 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

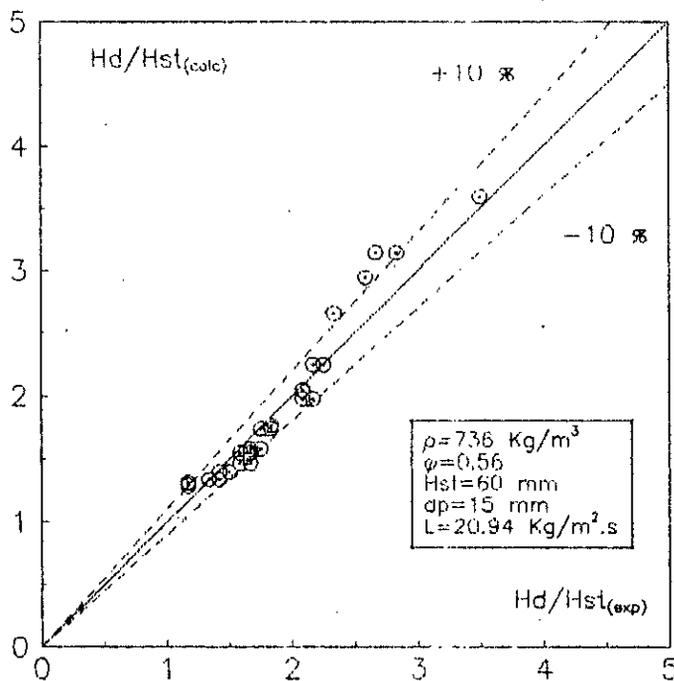


Figure 95 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

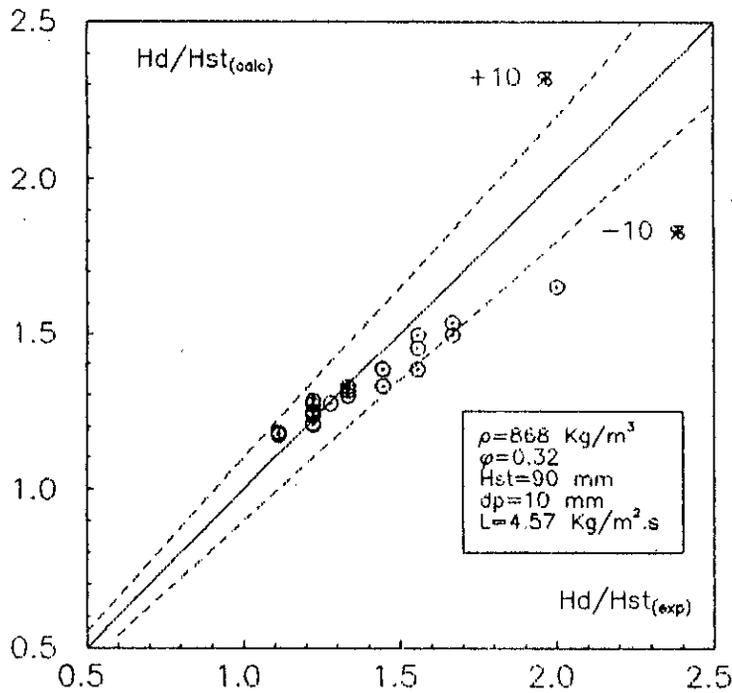


Figure 96 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

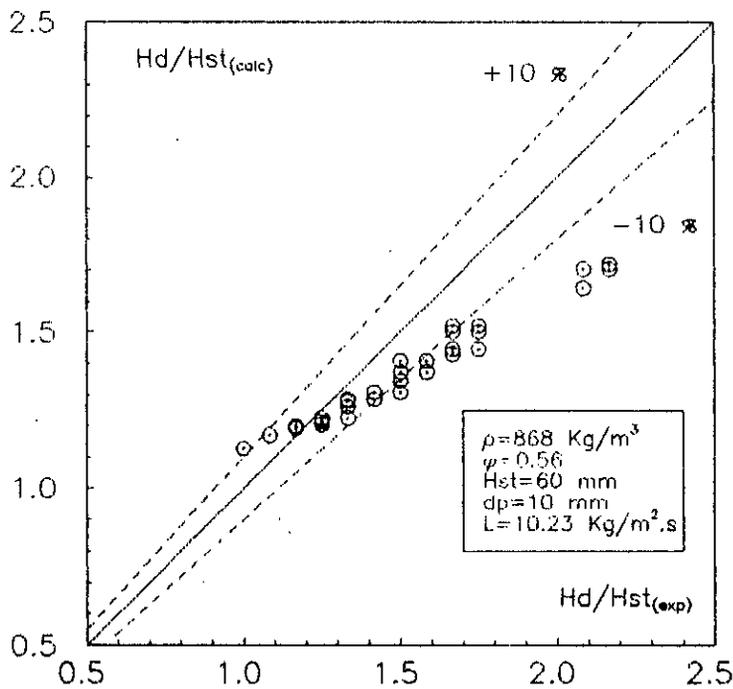


Figure 97 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation :
 Comparaison des valeurs calculées et expérimentales

CONCLUSION GENERALE

Nous avons étudié expérimentalement l'hydrodynamique du Contacteur à Lit Turbulent. Ce procédé consiste en la mise en contact d'un courant gazeux constituant la phase continue et d'un courant liquide, à contre-courant, à travers un lit contenant un garnissage solide constitué de particules sphériques de faible masse volumique.

Pour mener cette étude, nous avons conçu et réalisée la colonne d'étude devant assurer les conditions de fonctionnement suivantes:

- une distribution uniforme du liquide sous forme de gouttelettes au dessus du lit, à travers toute la section de la colonne, assurée par le distributeur de liquide spécialement conçu et réalisée à cet effet;
- une distribution uniforme du gaz à travers le lit, à l'aide du distributeur de gaz.

L'étude hydrodynamique du système air/eau a porté sur deux garnissages de diamètre 0,010 et 0,015 mm, de masses volumiques respectives 868 et 736 Kg/m³. L'effet des flux gazeux et liquide (G et L), de la hauteur statique de garnissage (Hst) et de l'aire libre de la grille support (φ), sur les paramètres hydrodynamiques a été étudié. Cette étude a mis en évidence les résultats suivants:

1) une influence significative des variables opératoires, telles que; les flux liquides et gazeux (G et L), la hauteur statique et les caractéristiques de garnissage (Hst, ρ_p et d_p), ainsi que la fraction de vide de la grille support sur les paramètres hydrodynamiques, à savoir, les pertes de charge (Δp), l'expansion du lit (Hd/Hst), et la vitesse minimum de fluidisation (Gmf).

a) Les résultats expérimentaux montrent que l'expansion du lit dépendait du flux gazeux et liquide, qu'elle était fortement affectée par l'ouverture de la grille support de garnissage et qu'elle était indépendante de la hauteur statique de garnissage.

Les résultats ont également mis en évidence l'existence de trois zones de variation de l'expansion avec l'augmentation du flux gazeux.

b) Les résultats expérimentaux font apparaître que la vitesse minimum de fluidisation décroît avec l'augmentation du flux liquide et avec la diminution du diamètre des particules.

Avec la diminution de l'aire libre de la grille support, la vitesse minimum de fluidisation diminue de manière appréciable. Cet effet diminue avec l'augmentation de la fraction de vide de la grille support.

c) Les résultats font apparaître que les pertes de charge à travers le lit augmentent avec l'accroissement du flux liquide, de la hauteur statique du garnissage et avec la dimension de l'aire libre de la grille support. L'évolution des pertes de charge pour chaque système expérimental étudié dépend fortement du flux gazeux.

2) l'existence des domaines de fluidisation (lit fixe, lit partiellement fluidisé, lit totalement fluidisé et état d'engorgement), dont les limites varient suivant la géométrie du système, les caractéristiques du garnissage, et l'arrosage liquide.

3) une influence notable des variables opératoires sur les zones de fonctionnement optimales en régime de fluidisation et ce pour les différents systèmes expérimentaux.

L'analyse de nos résultats expérimentaux a porté également sur la comparaison de nos résultats expérimentaux des pertes de charge et de l'expansion du lit avec les estimations de plusieurs corrélations de différent auteurs.

Parmi ces corrélations, certaines expriment assez bien nos résultats expérimentaux, néanmoins, leur utilisation ne peut être généralisée pour de larges intervalles des flux gazeux et liquide.

Nous avons proposé des corrélations pour les pertes de charge et pour l'expansion du lit spécifiques au système étudié et basées sur un très grand nombres de résultats expérimentaux.

$$(-\Delta p) = \left[\frac{(1-\epsilon_0)\rho_p g H_{st} \rho_g}{G^2} 267.4933 \cdot 10^5 \left(\frac{d_p U_{t,c} \rho_g}{\mu_g} \right)^{-1.7946} \left(\frac{d_p U_l \rho_l}{\mu_l} \right)^{0.2511} \left(\frac{H_{st}}{D_c} \right)^{1.1891} \varphi^{-0.2361} \right] \frac{G^2}{\rho_g}$$

$$\frac{H_d}{H_{st}} = 1 + [4,0999 \cdot 10^{-3} G - 7,4031 \cdot 10^{-4} G^2 + 9,4272 \cdot 10^{-5} G^3] \varphi^{-1.3700} L^{1.2200}$$

Pour chaque paramètre hydrodynamique, nous proposons une méthode d'estimation tenant compte de l'état hydrodynamique du lit

Références bibliographiques.

- [1] Aksel'rod, L. A., et M. M. Yakovenko,
"Certain Hydrodynamic Aspect of Mass Transfer Equipement with Mobile Spherical Packing"
Theor. Found. Chem Eng., 3, 124 (1969).
- [2] Balabekov, O.S., P.G. Ramankov, E.Ya. Tarat and M.F. Mikhalev,
"Operating Conditions of Columns with Wetted Moving Spherical Packing",
J. Appl. Chem. U.S.S.R., 42, 1454, (1969).
- [3] Balabekov, O.S., E.Ya. Tarat, P.G. Ramankov and M.F. Mikhalev,
"Hydrodynamic Design Calculations for Equipement with Wetted Fluidized Spherical Packing",
J. Appl. Chem. U.S.S.R., 42, 2128, (1969).
- [4] Balabekov, O.S., E.Ya. Tarat, P.G. Ramankov and M.F. Mikhalev,
"Hydrodynamics of an Absorber with a Fluidized Bed of Plastic Rings",
J. Appl. Chem. U.S.S.R., 44, 1068, (1971).
- [5] Barile, R.G. and D.W. Meyer.
"Turbulent Bed Cooling Tower",
Chem. Eng. prog. symposium series, 67, N°119, 134 (1971).
- [6] Barile, R.G., J.L. Dengler, and T.A. Hertwig.
"Performance and Design of a Turbulent Bed Colding Tower",
AIChE Symposium Series, 70, N°138, 154 (1974).
- [7] Begovitch, J. M., et J. S. Watson,
"Hydrodynamics Characteristics of Three Fluidised Beds",
J. F. Davidson and D. L. Kearns, Ed., 190, Cambridge Univ. Press (1978).
- [8] Blyakher, I.G., L.Ya. Zhivaikin, and N.A. Yurovskaya,
"Investigation of Hydrodynamics and Mass Transfer in Equipement with Movable Packing",
In. Chem. Eng., 7 (3), 485 (1967).
- [9] Borgwardt, R.,
"Limestone Scrubbing of SO₂ at EPA Pilot Plant",
U.S. E.P.A. Report (Aug., 1972).
- [10] Chen, B.H., and W.J.M. Douglas.
"Liquid Holdup and Minimum Fluidisation Velocity in Turbulent Contactor",
Can. J. Chem. Eng., 46, 245 (1968)

- [11] Chen, B.H., and W.J.M. Douglas,
"Axial Mixing of Liquid in Turbulent Bed Contactor",
Can. J. Chem. Eng. Prog., 59 (12), 85 (1963).
- [12] Dhanuka, V. R., J. B. Stepanek,
"Gas and Liquid Holdup and Pressure drop Measurements in a Three-Phase Fluidized
Bed",
in "Fluidization",
Ed. J. F. Davdson et D. L. Kearns, cambridge Univ. Press, Cambridge, Angleterre, P.179
(1978).
- [13] Douglas, H. R., I. W. A. Snider, and G.H. Tomlison II,
"The Turbulent Contact Absorber",
Chem. Eng. Prog., 59, N) 12, 85 (1963).
- [14] Douglas, W.J.M.,
"Heat and Mass Transfer in a Turbulent Bed Contactor",
Eng. Prog., 60 (7), 66 (1964).
- [15] Elenkov, and A. Kossev,
"Mass Transfer in the Liquid Phase in Apparatus with Mobile Packing",
Theor. Found. Chem. Eng., 4, 100 (1970).
- [16] Epstein, N., et al.,
"Scrubbing Tset Facility at the TVA Shawnee Power Plant",
AIChE Mtg., Philadelphia Nov., (1973).
- [17] Epstein, N.,
"Three Phase Fluidization: Some Knowledge Graps",
Can. J. Chem. Eng., 59. 649 (1981).
- [18] Fan L. S.,
"Gas-Liquid-Solid. Fluidization Engineering",
Ed. Butterworth Publishers, Stoneham, USA, (1989).
- [19] Gel'Perin, N.I., V.Z. Grishko, V.I. Sarchenko, and V.M. Shchedro,
"Investigation of the Operation of Absorbtion Appartus with a Refluxed Ball Packing
Type of Pseudo Liquified Layer",
Khimicheskoc, Neftyanoe Mashinostroenie, N°1. Jan. 22 (1966).
- [20] Gel'Perin, N.I., U.Y, Latyshev, and L.I. Blyakman,
"Rectification in Column with Fluidised Beds of Spherical Packing",
Int. Chem. Eng., 8, 691 (1968).
- [21] Gel'Perin N. I., V. I. Savchenko, and V. Z. Grishko,
"Some Hydrodynamics Laws of Apparatus Packed with Fluidized Spheres",
Theo. Chem. Eng., 2, 65, (1968).

- [22] Gel'Perin, N.I., V.Z. Grishko, and V.A. Mikhailov.
"Determination of Phase Contact Surface in Mass Transfer Equipment with Fluidized Spherical Packing",
Theor. Found. Chem. Eng., 6, 534 (1972).
- [23] Gel'Perin, N.I., E.N. Bukharkin, V.Z. Grishko, M.I. Tsylin,
"A Study of Contact Heat and Mass Transfer in Equipment with Fluidized Spherical Packing",
Int. Chem. Eng., 13, N°4, 615 (1973).
- [24] Gel'Perin, V.A. Liferenko, V.Z. Grishko, V.I. Sokolov, A.T. Eremin,
"Study of the Mass Transfer Characteristics of a Pilot-Plant Absorber Containing Fluidized Spherical Packing in the Purification of Gases from Phenol",
Int. Chem. Eng., 15 N°4, 675 (1975).
- [25] Gel'Perin, N.I., and B. S. Kruglyakov.
Sov. Chem. Ind., 53, 66 (1977).
- [26] Groeneveld, K. J. V.,
"Ph.D. Dissertation",
Technical University, Delft, The Netherlands, (1967).
- [27] Handl, R.,
"Ph.D. Dissertation",
Technical University, Clausthal, F.R.G., (1976).
- [28] Kielback, A.W.,
"The Development of Floating-Bed Scrubbers",
Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 57, N°35, 51 (1959).
- [29] Khanna, R.T.,
Ph.D. Dissertation,
McGill University (1971).
- [30] Kito, M., M. Shimada, T. Sakai, S. Sugiyama, and C. Y. Wen,
"Performance of Turbulent Bed Contactor. Gas Holdup and Interfacial Area under Liquid Stagnant Flow",
in "Fluidization Technology", ed. by D.L. Kealrns, I. p 411, Hemisphere (1976).
- [31] Kito, M., M. Sawada, M. Shimada, M. Takada, T. Sakai, and S. Sugiyama,
"Gas holdup in a Mobile Beds with stagnant liquid Flow",
Int. Chem. Eng., 16 N°4, 701 (1976).
- [32] Kito, M., M. Shimada, R. Ingima, T. Sakai, M. Takada, S. Sugiyama,
"Liquid Vapor Interfacial Area for a Liquid Batch Type Mobile Bed Contactor",
Int. Chem. Eng., 16, N°4, 705 (1976).

- [33] Kito, M., Y. Kayama, T. Sakai, S. Sugiyama,
"Minimum Fluidisation Velocity in a Mobile Bed",
Int. Chem. Eng., 16, N°4, 711 (1976).
- [34] Kito, M., T. Monma, Y. Kayama, T. Sakai, and S. Sugiyama,
"Pressure Drop and Bed Expansion in a Mobile Bed",
Kagaku Kogaku Konbunshu, 2(5), 476 (1976).
- [35] Kito, K. Tabei, and K. Murata,
"Gas and Liquid Holdups in Mobile Beds under the Countercurrent Flow of Air and
Liquid",
Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 17(4), 568 (1978).
- [36] Kossev, A., G. Peev, and D. Elenkov,
"On the Interfacial Area in Floating Bed Contactors",
Verfahrenstechnik, 5(8), 340 (1971).
- [37] Kossev, A., and D. Elenkov,
"Mass transfer in the Gas Phase in Apparatus with a Mobile Packing",
Theor. Found. Chem. Eng., 7, 795 (1973).
- [38] Koval', Zh. A., A. V. Bespalov, O. G. Kuleshov, and A. P. Zhukov,
"Experimental Study of Lengthwise Liquid Mixing in a Column Having a Mobile Bed
Packing",
Theor. Found. Chem. Eng., 9, 289 (1975).
- [39] Krainev, N. I., M. I. Niyazov, I. P. Levsh, and S. U. Umarov,
"Hydrodynamics of an Absorber with a Fluidised Bed of Plastic Rings",
Y. Appl. Chem. U.S.S.R., 41, 1961 (1968).
- [40] Kunii D., and O. Levenspiel,
"Fluidization Engineering",
Wiley, New-York (1969).
- [41] Kuroda, M., K. Tabei,
"Theoretical Discussion of the Minimum Fluidizing Velocity in a Mobile Bed",
Int. Chem. Eng., 21, N°2, 219 (1981).
- [42] Leva, M.,
"Fluidization",
Mc Graw-Hill (1959).
- [43] Leung, L.S., B.K. O'Neill, and D.J. Nicklin,
in Proceeding of the 1st Pacific Area Chemical Engineering Congress (PACHEC), III, p
82, Tokyo (1972).
- [44] Levsh, I.P., N.I. Krainev, and M.I. Niyazov,
"Calculations of the Pressure Drop and Heights of Three-Phase Fluidized Beds",
Int. Chem. Eng. N°2 311 (1968)

- [45] Levsh, I.P., N.I. Niyazov N.I. Krainev, F.F. Ganikhanova,
"Mass Transfer in Absorbers with Fluidized Packed Beds",
Int. Chem. Eng., 8, N°3, 379 (1968).
- [46] Levsh, I.P., N.I. Krainev, N.I. Niyazov,
"Hydrodynamic Calculation of Absorbers with Fluidized Beds",
Int. Chem. Eng., 8, N°4, 619 (1968).
- [47] Mayak, V.I., and V.I. Matrozov,
"Hydraulic Résistance of Plate Columns with Fluidized Packing",
Theor. Found. Chem. Eng. 3, 64 (1969).
- [48] Miconnet, M.P., P. Guignon and J.F. Large,
"The Scrubbing of Acid Gases in Columns with Fixed or Mobile Packing",
Int. Chem. eng., 22, 133 (1982).
- [49] Muroyama, K., and L.S. Fan,
"Fundamentals of Gas-liquid-Solid Fluidization",
AIChE J. 31, 1 (1985).
- [50] O'Neill, B.K. , D.J. Nicklin, N.J. Morgan and L.S. Leung,
"The Hydrodynamics of Gas-Liquid Contacting in Tower with Fluidized Packing",
Can. J. Chem. Eng. 50, 595 (1972).
- [51] O'Neill, B.K., D.J. Nicklin, and L.S. Leung,
"Fluidization and its Applications",
Ed. by H. Angelo, J.P. Couderc, H. Gilbert, and C. Laguerie, p 365, Cepadues-Editions,
Toulouse (1974).
- [52] Petrov, P. M., Tassaev, Zh.
Chem.-Ing. Technol., 50, 887 (1978).
- [53] Rama, O.P., D.P. Rao and V. Subba Rao.
"Hydrodynamics of a Mobile Bed Contactor with Low Density Packing Particules of
Different Shapes",
Can. J. Chem. Eng., 61, 863 (1983).
- [54] Rama, O.P., D.P. Rao and V. Subba Rao.
"Liquid-Phase Axial Mixing Study in a Bed Contactor with Low Density Particules",
Can. J. Chem. Eng., 63, 444 (1985).
- [55] Strumillo, C., J. Adamioc, T.Kudra,
"Packed Columns with Expanding Beds",
14, N°4, 652 (1974).
- [56] Strumillo, C., and T. Kudra,
"Interfacial Area in Three-Phase Fluidized Beds",
Chem. Eng sci 32, 229. (1979).

- [57] Tabei, K., M. Hasatani and M. Kuroda,
"Effective Gas-Liquid Interfacial Area in a Mobile Bed Contactor",
Int. Chem. Eng., 29, N°4, 679, (1989).
- [58] Tarat, E. Ya., Burkat, V. S., Dudorova, V. S. J.,
Appl. Chem. USSR (Engl. Trans.) 47, 105 (1974).
- [59] Tichy, A. Wong, and W.J.M. Douglas,
"Pressure Drop in a Mobile-Bed Contactor",
Can. J. Chem. Eng., 50, 215 (1972).
- [60] Tichy, and W.J.M. Douglas,
"Bed Expansion in a Mobile-Bed Contactor",
Can. J. Chem. Eng., 50, 702 (1972).
- [61] Tichy, and W.J. M. Douglas,
"Certain Hydrodynamic Characteristics of Mobile-Bed Contactors",
Can. J. Chem. Eng., 51, 618 (1973).
- [62] Ushida, S.C.S. Wong, and C.Y. Wen,
"Mechanics of a Turbulent Contact Absorber",
Can. J. Chem. Eng., 55, 392 (1977).
- [63] Ushida, T. Suzuki and H. Maejima,
"The Flooduid Condition of Turbulent Contact Absorber",
Can. J. Chem. Eng., 58, 406 (1980).
- [64] Uysal, B.Z.,
"Hydrodynamic and Particulate Recovery Studies in Mobile-Bed Contacting",
Ph.D. Thesis, Mc-Gill Univ. (1978).
- [65] Visvanathan, C. and L.S. Leung,
"Design of a Fluidized Bed Scrubbers",
Int. Eng. Chem. Process Des. Dep., 24, 677 (1985).
- [66] Vunjak-Novakovic, G.V., D.V. Vukovic, A. Obermayer, and A. Vogelpahl,
"Hydrodynamics and Mass Transfer Performance of a Turbulent Contact bsorber",
in "Fluidization", Ed. by G.R. Grace and Matson p.253, Plenum Press New York (1980).
- [67] Vunjak-Novakovic, G.V., D.V. Vukovic, and H. Littman,
"Hydrodynamics of Turbulent Bed Contactors 1. Opération Regimes and Liquid Holdup",
Ind. Eng. Chem. Res., 26(5), 958 (1987).
- [68] Vunjak-Novakovic, G.V., D.V. Vukovic, and H. Littman,
"Hydrodynamics of Turbulent Bed Contactors 2. Pressure Drop, Bed Expansion, and
Minimum Fluidizing Velocity",
Ind. Eng. Chem. Res., 26(5), 967 (1987).

- [69] Wallis, G. B.,
"One Dimensional Two-Phase Flow",
McGraw Hill, New York (1969).
- [70] Wild, G., M. Saberian, J. L. Shwartz et J. C. Charpentier,
"Les Réacteurs à Lits Fluidisés Gaz-Liquide-Solide. Etat de l'Art et Perspectives Industrielles",
Entropie N° 106, 3, (1982).
- [71] Wozniak, M., and K. Ostergaard,
"An Investigation of Mass Transfer in a Countercurrent Three-Phase Fluidized Bed",
Chem. Eng. sc., 28, 167 (1978).
- [72] Wozniak, M.
"Pressure Drop and Effective Interfacial Area in a Column with a Mobile Bed",
Int. Chem. Eng., 17(3), 553 (1977).
- [73] Zhukov V. A. P. et al,
"Investigations of Mass Transfer in the gas Phase in an Apparatus with Mobile-Bed Packing with Allowance for Longwise Liquide Mixing,"
Theor. Chem. Eng., 11, 371, (1967).

Communications présentées :

"Etude de l'Expansion dans un Lit à Contact Turbulent", Congrès Européen de Fluidisation, Las-Palmas (Espagne) du 16 au 18 février 1994

"Etude de l'Hydrodynamique de l'Absorbeur à Contact Turbulent", Séminaire National de Génie des Procédés, U.S.T.H.B.-Alger (Algérie) du 8 au 10 février 1994

NOMENCLATURE

Lettres latines

- a_d : Aire interfaciale effective par unité de volume de lit dilaté
 a_l : Aire interfaciale effective par unité de volume de liquide
 a_p : Aire de la surface géométrique des particules par unité de volume de lit statique
 a_{st} : Aire interfaciale effective par unité de volume de lit statique
 A : Aire interfaciale effective par unité de section droite de la colonne
 C_{Ai} : Concentration du gaz réactant à l'interface liquide
 C_{B0} : Concentration de la phase liquide au sein du liquide
 C_{fi} : Coefficient de friction apparent pour la phase gazeuse
 C_{fs} : Coefficient de friction apparent pour le courant d'une phase à travers le lit fixe
 d : Diamètre équivalent des rainures ou orifice dans la grille support
 d_p : Diamètre des particules
 D : Diamètre équivalent de la surface libre de la grille support
 D_c : Diamètre de la colonne
 D_l : Diffusivité molaire en phase liquide
 D_G : Diffusivité molaire en phase gazeuse
 G : Vitesse massique du flux par unité de section pour le gaz
 G_{mf} : Vitesse massique du flux par unité de section pour le début de fluidisation
 G_{Mg} : Vitesse molaire du gaz par unité de section de la colonne
 h_l : Hauteur du liquide dans la colonne correspondant à la rétention liquide
 H_d : Hauteur du lit dilaté
 H_d : Hauteur statique du lit
 H_{0g} : Hauteur globale de l'unité de transfert côté gaz
 H_e : Constante de la loi de Henry
 k_g : Coefficient de transfert de masse à l'interface gaz-liquide côté gaz
 k_l : Coefficient de transfert de masse à l'interface gaz-liquide côté liquide
 k_{lad} : Coefficient volumétrique de transfert de masse côté liquide
 k_{lA} : Coefficient volumétrique de transfert de masse côté gaz sur l'unité d'aire de la section droite de la colonne
 k_r : Constante de la réaction de pseudo-premier ordre
 K_g : Coefficient global de transfert de masse gaz-liquide
 K_{gast} : Coefficient volumétrique global de transfert de masse de la phase gazeuse par rapport à la hauteur du lit statique

| | |
|----------------------|--|
| L : | Flux massique du liquide par unité de section de la colonne |
| M_A : | Poids moléculaire de l'air |
| N_{0g} : | Nombre d'unité de transfert globale de la phase gaz |
| $-\Delta P_c$: | Pertes de charge totales à travers la colonne |
| $-\Delta P$: | Pertes de charge à travers le lit |
| $-\Delta P_g$: | Pertes de charge dues à la grille support |
| $-\Delta P_w$: | Pertes de charge dues aux parois de la colonne |
| $-\Delta P_\sigma$: | Pertes de charge dues à la tension superficielle gaz-liquide |
| U_g : | Vitesse superficielle du gaz |
| U_{gmf} : | Vitesse superficielle du gaz au minimum de fluidisation |
| U_{gmfd} : | Vitesse superficielle du gaz au minimum de fluidisation en fluidisation totale |
| U_l : | Vitesse superficielle du liquide |
| U_t : | Vitesse terminale de la particule |

Lettres grecques

| | |
|---------------------------|--|
| ε_d : | Porosité du lit dilaté |
| ε_0 : | Porosité du lit statique |
| ε_g : | Rétention de gaz |
| ε_{gmf} : | Rétention de gaz au minimum de fluidisation |
| ε_l : | Rétention liquide |
| ε_{lmf} : | Rétention liquide au minimum de fluidisation |
| $\varepsilon_{l,st}$: | Rétention liquide rapportée au volume de lit statique |
| $\varepsilon_{l,st,st}$: | Rétention liquide opératoire rapportée au volume de lit statique |
| ε_s : | Rétention solide |
| $\varepsilon_{s,st}$: | Rétention solide rapportée au volume de lit statique |
| μ_g : | Viscosité du gaz |
| μ_l : | Viscosité du liquide |
| Ω : | Section de la colonne |
| ρ_g : | Masse volumique du gaz |
| ρ_l : | Masse volumique du liquide |
| ρ_p : | Masse volumique du garnissage sec |
| ρ_{ws} : | Masse volumique du garnissage mouillé |
| σ : | Tension superficielle gaz/liquide |
| φ : | Rapport de l'aire libre de la grille support par rapport à la section droite de la colonne |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|---|------|
| Figure 1 : Classification des modes de fluidisation d'après la nature relative des courants | 6 |
| Figure 2 : Classification de base des systèmes triphasiques | 7 |
| Figure 3 : Diagramme d'écoulement des courants des systèmes triphasiques | 9 |
| Figure 4 : Représentation typique des pertes de charge dans une colonne à garnissage | 11 |
| Figure 5 : Gradient de pression représentant les modes de fluidisation de l'Absorbeur à Contact Turbulent | 11 |
| Figure 6 : Régimes opératoires pour les types de fluidisation "I ACT" et "II ACT" | 13 |
| Figure 7 : Domaines de variation des pertes de charge | 17 |
| Figure 8 : Evolution de la rétention liquide avec la vitesse superficielle du liquide | 23 |
| Figure 9 : Evolution de la rétention de gaz avec la vitesse superficielle du gaz | 27 |
| Figure 10 : Evolution de la vitesse minimum de fluidisation avec la vitesse superficielle du liquide | 32 |
| Figure 11 : Evolution de l'expansion du lit avec la vitesse superficielle du gaz | 38 |
| Figure 12 : Schéma général de l'installation expérimentale | 54 |
| Figure 13 : Colonne d'étude | 56 |
| Figure 14 : Distributeur de liquide: Disposition des tubes verticaux | 58 |
| Figure 15 : Coupe d'un tube parallèle du distributeur de liquide | 58 |
| Figure 16 : Distributeur de gaz | 59 |
| Figure 17 : Grille support de garnissage | 60 |
| Figure 18 : Prise de pression | 63 |
| Figure 19 : Mesure de la vitesse minimum de fluidisation | 64 |
| Figure 20 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux | 69 |
| Figure 20 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux | 69 |
| Figure 22 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux | 70 |
| Figure 23 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux | 70 |
| Figure 24 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Domaines de variation | 71 |
| Figure 25 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Domaines de Variation | 71 |
| Figure 26 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Domaines de Variation | 72 |
| Figure 27 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Domaines de variation | 72 |
| Figure 28 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de l'arrosage liquide | 74 |
| Figure 29 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de l'arrosage liquide | 75 |
| Figure 30 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de l'arrosage liquide | 76 |
| Figure 31 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de l'arrosage liquide | 77 |

| | |
|--|----|
| Figure 32 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support | 78 |
| Figure 33 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support | 78 |
| Figure 34 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support | 79 |
| Figure 35 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support | 79 |
| Figure 36 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de la hauteur statique de garnissage | 81 |
| Figure 37 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de la hauteur statique de garnissage | 81 |
| Figure 38 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de la hauteur statique de garnissage | 82 |
| Figure 39 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux : Influence de la hauteur statique de garnissage | 82 |
| Figure 40 : Estimation de la rétention liquide | 83 |
| Figure 41 : Estimation de la rétention liquide | 83 |
| Figure 42 : Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 84 |
| Figure 43 : Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 84 |
| Figure 44 : Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 85 |
| Figure 45 : Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 85 |
| Figure 46 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux | 90 |
| Figure 47 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux | 90 |
| Figure 48 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux | 91 |
| Figure 49 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux | 91 |
| Figure 50 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Zones de variation de l'expansion | 92 |
| Figure 50 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Zones de variation de l'expansion | 92 |
| Figure 52 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Zones de variation de l'expansion | 93 |
| Figure 53 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Zones de variation de l'expansion | 93 |
| Figure 54 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'arrosage liquide | 95 |
| Figure 55 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'arrosage liquide | 96 |
| Figure 56 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'arrosage liquide | 97 |
| Figure 57 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'arrosage liquide | 98 |
| Figure 58 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 99 |
| Figure 59 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 99 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure 60 : | Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 100 |
| Figure 61 : | Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de l'aire libre de la grille support de garnissage | 100 |
| Figure 62 : | Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de la hauteur statique de garnissage | 102 |
| Figure 63 : | Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de la hauteur statique de garnissage | 102 |
| Figure 64 : | Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de la hauteur statique de garnissage | 103 |
| Figure 65 : | Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux : Effet de la hauteur statique de garnissage | 103 |
| Figure 66 : | Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 104 |
| Figure 67 : | Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 104 |
| Figure 68 : | Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 105 |
| Figure 69 : | Comparaison des résultats avec les estimations selon différents auteurs | 105 |
| Figure 70 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide | 110 |
| Figure 71 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide | 110 |
| Figure 72 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide | 111 |
| Figure 73 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide | 111 |
| Figure 74 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de l'aire libre de la grille support | 112 |
| Figure 75 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de l'aire libre de la grille support | 112 |
| Figure 76 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de l'aire libre de la grille support | 113 |
| Figure 77 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de l'aire libre de la grille support | 113 |
| Figure 78 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de la dimension du garnissage | 115 |
| Figure 79 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de la dimension du garnissage | 115 |
| Figure 80 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de la dimension du garnissage | 116 |
| Figure 81 : | Variation de la vitesse minimum de fluidisation avec le flux liquide : Effet de la dimension du garnissage | 116 |
| Figure 82 : | Estimation des pertes de charge par corrélation | 120 |
| Figure 83 : | Estimation des pertes de charge par corrélation | 120 |
| Figure 84 : | Estimation des pertes de charge par corrélation | 121 |
| Figure 85 : | Estimation des pertes de charge par corrélation | 121 |
| Figure 86 : | Estimation des pertes de charge par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 122 |

| | |
|---|-----|
| Figure 87 : Estimation des pertes de charge par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 122 |
| Figure 88 : Estimation des pertes de charge par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 123 |
| Figure 89 : Estimation des pertes de charge par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 123 |
| Figure 90 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation | 125 |
| Figure 91 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation | 125 |
| Figure 92 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation | 126 |
| Figure 93 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation | 126 |
| Figure 94 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 127 |
| Figure 95 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 127 |
| Figure 96 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 128 |
| Figure 97 : Estimation de l'expansion du lit par corrélation: Comparaison des valeurs calculées et expérimentales | 128 |

LISTE DES DIFFERENTS TABLEAUX

| | Page |
|---|------|
| Tableau 1 : Classification des systèmes triphasiques suivant le mouvement des particules | 5 |
| Tableau 2 : Corrélations pour l'estimation des pertes de charge | 19 |
| Tableau 3 : Corrélations pour l'estimation de la rétention liquide | 24 |
| Tableau 4 : Corrélations pour l'estimation de la rétention de gaz | 28 |
| Tableau 5 : Corrélations pour l'estimation de la vitesse minimum de fluidisation | 33 |
| Tableau 6 : Corrélations pour l'estimation de l'expansion du lit fluidisé | 39 |
| Tableau 7 : Conditions expérimentales pour la détermination du coefficient local de transfert de matière côté liquide (k_{lA}), pour les différents auteurs | 45 |
| Tableau 8 : Conditions expérimentales et méthodes utilisées pour la détermination du coefficient global de transfert de matière (K_{gA}), pour les différents auteurs | 46 |
| Tableau 9 : Conditions expérimentales pour la détermination du coefficient local de transfert de matière côté gaz (k_{gA}), pour les différents auteurs | 49 |
| Tableau 10 : Conditions expérimentales de la présente étude | 61 |
| Tableau 11 : Caractéristiques du garnissage | 65 |

ANNEXE A1 : Etalonnage des débitmètres de liquide

On a utilisé alternativement deux débitmètres ("A" et "B") pour la mesure des débits de liquide.

Le débitmètre "A" a été étalonné pour des flux massiques allant de 0 à 20,94 Kg/m².s et le débitmètre "B" pour l'intervalle de 20,94 à 27,90 Kg/m².s. Ceci a été nécessaire pour opérer dans les intervalles d'utilisation fiables et s'éloigner, ainsi, des limites des débitmètres.

L'étalonnage a été obtenu en mesurant à l'aide d'un chronomètre (gradué en 1/10^e de seconde) le temps nécessaire pour le remplissage d'un réservoir de volume connu (20 l ± 0,2). L'opération a été répétée cinq fois et on obtient les courbes d'étalonnage ci après.

L'erreur relative sur le flux massique du liquide (L [Kg/m².s]) s'exprime par la relation :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta \rho_l}{\rho_l} + \frac{2 \cdot \Delta D_c}{D_c}$$

où

v: Volume du liquide mesuré

t: Temps de remplissage du réservoir de volume connu

ρ_l : Masse volumique du liquide

D_c: Diamètre de la colonne

On trouve $\frac{\Delta L}{L}$ de l'ordre de 1.10 %.

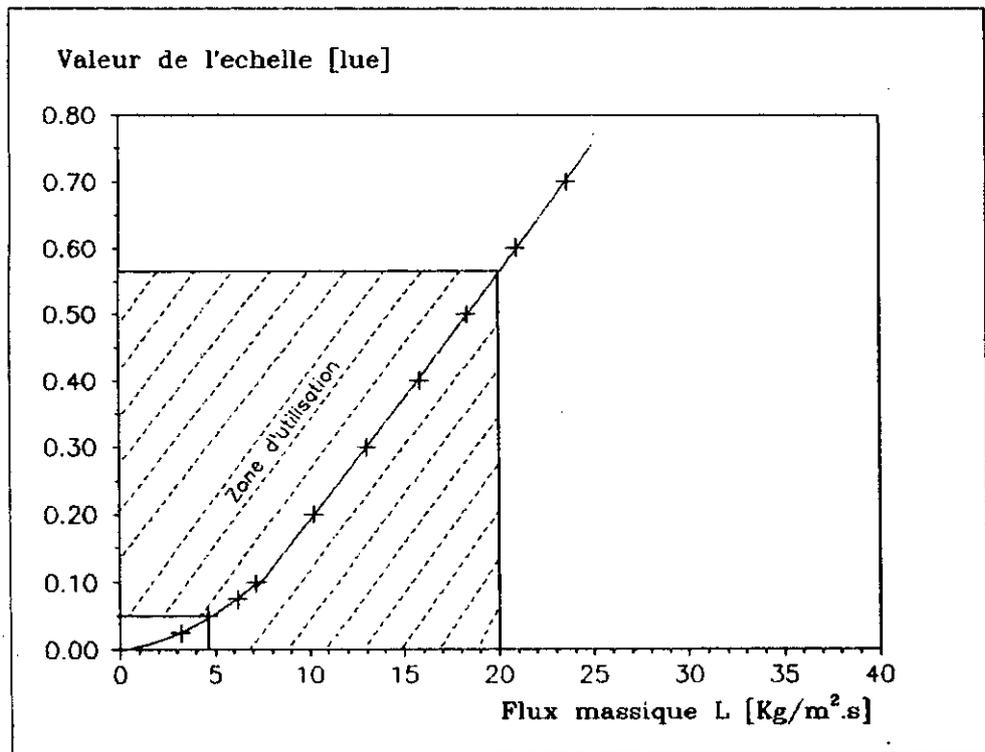


Figure A1: Courbe d'étalonnage du débitmètre (A)

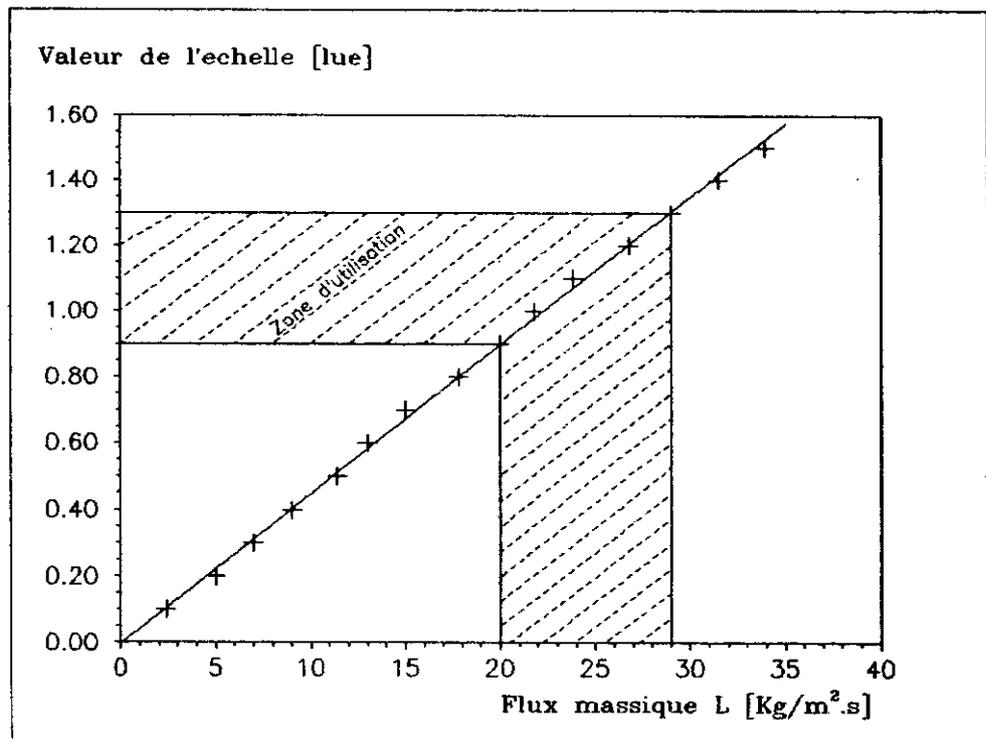


Figure A2: Courbe d'étalonnage du débitmètre (B)

ANNEXE A2 : Etalonnage du rotamètre de gaz

Le rotamètre utilisé a été étalonné à l'aide d'un banc d'étalonnage à diaphragme. L'étalonnage du rotamètre a été conduit en plaçant le rotamètre en série avec le banc d'étalonnage.

L'expression donnant le débit massique G_g [Kg/s], en fonction de l'échelle ainsi que l'erreur relative sur le débit massique ont été trouvées à l'aide d'un logiciel d'étalonnage du rotamètre :

$$G_g [T/P]^{1/2} \cdot 10^4 [SI] = 12,5594 \% \text{ Echelle} - 0,03826$$

L'erreur relative sur le débit massique est de : 1,47 %.

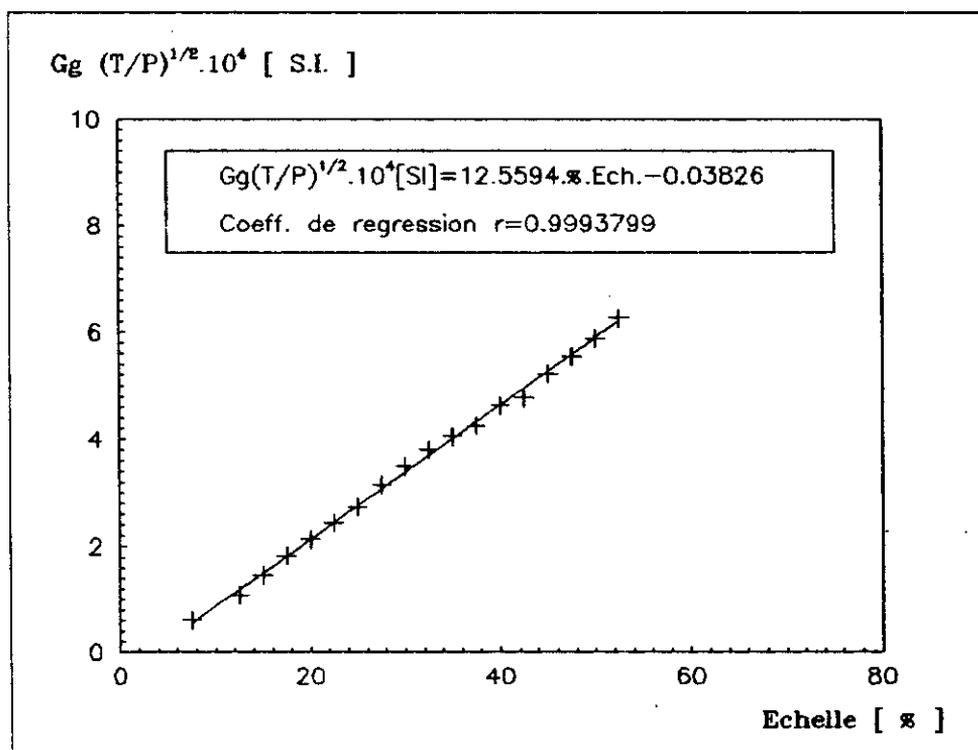


Figure A2 : Courbe d'étalonnage du rotamètre

ANNEXE A3 : Porosité du lit de garnissage

La porosité a été déterminée en mesurant le volume d'eau contenue dans le lit contenant une hauteur donnée de garnissage à l'état statique.

La porosité du lit dépend du diamètre des particules sphériques du garnissage et dans une moindre mesure de la hauteur statique.

les résultats sont donnés sur le tableau A3 :

Tableau A3 : Porosité du lit de garnissage

| Diamètre des sphères de garnissage (d_p) [mm] | Hauteur statique (Hst) [mm] | Porosité (ϵ) |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| 10 | 90 | 0,370 |
| | 60 | 0,362 |
| 15 | 120 | 0,405 |
| | 90 | 0,398 |
| | 60 | 0,392 |

TABLEAU A.4.1: Résultats des mesures des pertes de charge Série I :

| Série I : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $dp = 10 \text{ mm}$ $\varphi = 0.32$ $Hst = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 1.302 | 52 | 1 | 0.932 | 58 | 1 | 0.932 | 75 | 1 | 0.699 | 75 | 1 | 0.530 | 120 |
| 2 | 1.379 | 50 | 2 | 0.932 | 60 | 2 | 0.932 | 76 | 2 | 0.699 | 70 | 2 | 0.932 | 140 |
| 3 | 1.560 | 52 | 3 | 0.937 | 60 | 3 | 1.400 | 88 | 3 | 0.733 | 80 | 3 | 1.166 | 160 |
| 4 | 1.560 | 50 | 4 | 0.975 | 62 | 4 | 1.400 | 92 | 4 | 0.733 | 75 | 4 | 1.166 | 150 |
| 5 | 1.959 | 57 | 5 | 0.975 | 64 | 5 | 1.400 | 90 | 5 | 0.796 | 85 | 5 | 1.400 | 150 |
| 6 | 1.959 | 58 | 6 | 1.251 | 64 | 6 | 1.400 | 94 | 6 | 0.932 | 92 | 6 | 1.400 | 160 |
| 7 | 2.003 | 57 | 7 | 2.249 | 82 | 7 | 1.914 | 108 | 7 | 0.932 | 90 | 7 | 1.434 | 160 |
| 8 | 2.003 | 56 | 8 | 2.249 | 84 | 8 | 1.914 | 105 | 8 | 1.021 | 96 | 8 | 1.498 | 160 |
| 9 | 2.362 | 55 | 9 | 2.362 | 90 | 9 | 2.287 | 105 | 9 | 1.104 | 102 | 9 | 1.498 | 165 |
| 10 | 2.362 | 57 | 10 | 2.803 | 94 | 10 | 2.287 | 110 | 10 | 1.104 | 105 | 10 | 1.867 | 170 |
| 11 | 2.803 | 58 | 11 | 2.803 | 96 | 11 | 2.504 | 105 | 11 | 1.318 | 120 | 11 | 2.210 | 170 |
| 12 | 3.005 | 54 | 12 | 2.939 | 94 | 12 | 2.504 | 110 | 12 | 1.318 | 125 | 12 | 2.393 | 180 |
| 13 | 3.316 | 60 | 13 | 3.195 | 95 | 13 | 2.803 | 115 | 13 | 1.400 | 125 | 13 | 2.569 | 180 |
| 14 | 3.316 | 59 | 14 | 3.738 | 96 | 14 | 3.738 | 112 | 14 | 1.400 | 130 | 14 | 2.803 | 180 |
| 15 | 3.375 | 62 | 15 | 3.760 | 98 | 15 | 3.963 | 120 | 15 | 1.474 | 125 | 15 | 2.803 | 170 |
| 16 | 3.375 | 58 | 16 | 3.920 | 97 | 16 | 4.788 | 115 | 16 | 1.867 | 130 | 16 | 3.070 | 180 |
| 17 | 3.375 | 60 | 17 | 3.920 | 96 | 17 | 4.788 | 112 | 17 | 1.867 | 135 | 17 | 3.729 | 170 |
| 18 | 3.494 | 60 | 18 | 4.179 | 94 | 18 | 5.015 | 115 | 18 | 2.335 | 135 | 18 | 3.738 | 170 |
| 19 | 3.738 | 58 | 19 | 4.205 | 98 | 19 | 5.171 | 120 | 19 | 2.362 | 136 | 19 | 4.094 | 170 |
| 20 | 3.738 | 57 | 20 | 4.205 | 96 | 20 | 5.608 | 117 | 20 | 2.399 | 140 | 20 | 4.673 | 180 |
| 21 | 3.920 | 61 | 21 | 4.411 | 98 | 21 | 5.608 | 115 | 21 | 2.399 | 135 | 21 | 4.673 | 170 |
| 22 | 3.920 | 60 | 22 | 4.411 | 96 | 22 | 6.543 | 120 | 22 | 2.770 | 140 | 22 | 5.011 | 170 |
| 23 | 4.094 | 61 | 23 | 4.422 | 98 | 23 | 6.608 | 120 | 23 | 2.803 | 136 | 23 | 5.011 | 180 |
| 24 | 4.094 | 60 | 24 | 4.422 | 100 | 24 | 7.388 | 120 | 24 | 2.872 | 140 | 24 | 5.608 | 180 |
| 25 | 4.673 | 58 | 25 | 4.673 | 96 | 25 | 8.094 | 130 | 25 | 2.939 | 142 | 25 | 5.608 | 190 |
| 26 | 4.673 | 62 | 26 | 4.788 | 98 | 26 | 9.253 | 145 | 26 | 2.939 | 138 | 26 | 6.543 | 180 |
| 27 | 4.673 | 60 | 27 | 5.011 | 98 | 27 | 9.253 | 140 | 27 | 2.939 | 140 | | | |
| 28 | 4.690 | 60 | 28 | 5.011 | 96 | | | | 28 | 3.256 | 145 | | | |
| 29 | 5.286 | 60 | 29 | 5.119 | 96 | | | | 29 | 3.256 | 140 | | | |
| 30 | 5.286 | 61 | 30 | 5.140 | 98 | | | | 30 | 3.432 | 140 | | | |
| 31 | 5.608 | 64 | 31 | 5.262 | 98 | | | | 31 | 3.738 | 140 | | | |
| 32 | 5.608 | 66 | 32 | 5.262 | 96 | | | | 32 | 3.920 | 145 | | | |
| 33 | 5.882 | 68 | 33 | 5.608 | 96 | | | | 33 | 3.920 | 140 | | | |
| 34 | 5.882 | 66 | 34 | 5.608 | 98 | | | | 34 | 4.673 | 140 | | | |
| 35 | 6.543 | 68 | 35 | 6.014 | 100 | | | | 35 | 5.119 | 145 | | | |
| 36 | 6.543 | 72 | 36 | 6.394 | 105 | | | | 36 | 5.608 | 145 | | | |
| 37 | 9.253 | 84 | 37 | 6.394 | 100 | | | | 37 | 5.608 | 150 | | | |
| 38 | 9.253 | 80 | 38 | 6.868 | 110 | | | | 38 | 6.543 | 160 | | | |

TABLEAU A.4.2: Résultats des mesures des pertes de charge Série II :

| Série II : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 2.084 | 56 | 1 | 0.662 | 26 | 1 | 0.464 | 40 | 1 | 0.536 | 45 | 1 | 0.464 | 60 |
| 2 | 2.084 | 57 | 2 | 0.662 | 28 | 2 | 0.662 | 40 | 2 | 0.536 | 50 | 2 | 0.464 | 56 |
| 3 | 2.166 | 62 | 3 | 0.883 | 37 | 3 | 0.662 | 45 | 3 | 0.697 | 60 | 3 | 0.662 | 80 |
| 4 | 2.166 | 60 | 4 | 0.883 | 36 | 4 | 0.832 | 58 | 4 | 0.697 | 58 | 4 | 0.697 | 86 |
| 5 | 2.200 | 60 | 5 | 1.164 | 48 | 5 | 0.832 | 50 | 5 | 0.976 | 74 | 5 | 0.931 | 95 |
| 6 | 2.200 | 62 | 6 | 1.164 | 50 | 6 | 0.883 | 52 | 6 | 0.976 | 78 | 6 | 0.931 | 100 |
| 7 | 2.392 | 60 | 7 | 1.397 | 50 | 7 | 0.883 | 54 | 7 | 0.976 | 82 | 7 | 0.954 | 100 |
| 8 | 2.934 | 56 | 8 | 1.499 | 62 | 8 | 0.976 | 60 | 8 | 1.221 | 82 | 8 | 0.976 | 98 |
| 9 | 2.934 | 57 | 9 | 1.749 | 68 | 9 | 1.193 | 72 | 9 | 1.326 | 88 | 9 | 1.104 | 100 |
| 10 | 2.934 | 60 | 10 | 1.749 | 70 | 10 | 1.362 | 76 | 10 | 1.326 | 84 | 10 | 1.593 | 110 |
| 11 | 3.000 | 60 | 11 | 1.910 | 70 | 11 | 1.362 | 78 | 11 | 1.326 | 90 | 11 | 1.631 | 110 |
| 12 | 3.576 | 58 | 12 | 1.910 | 68 | 12 | 1.531 | 80 | 12 | 1.432 | 84 | 12 | 1.997 | 115 |
| 13 | 3.576 | 64 | 13 | 2.042 | 66 | 13 | 1.631 | 80 | 13 | 1.631 | 88 | 13 | 2.331 | 120 |
| 14 | 3.751 | 60 | 14 | 2.331 | 68 | 14 | 1.910 | 80 | 14 | 1.631 | 96 | 14 | 2.388 | 120 |
| 15 | 3.751 | 58 | 15 | 2.331 | 70 | 15 | 2.098 | 78 | 15 | 1.710 | 94 | 15 | 2.445 | 120 |
| 16 | 3.832 | 60 | 16 | 2.331 | 66 | 16 | 2.211 | 82 | 16 | 1.710 | 88 | 16 | 3.065 | 120 |
| 17 | 4.302 | 60 | 17 | 2.564 | 72 | 17 | 2.211 | 78 | 17 | 1.786 | 90 | 17 | 3.722 | 120 |
| 18 | 4.302 | 58 | 18 | 2.934 | 68 | 18 | 2.272 | 80 | 18 | 1.999 | 90 | 18 | 3.722 | 122 |
| 19 | 4.432 | 58 | 19 | 2.934 | 70 | 19 | 2.564 | 82 | 19 | 2.249 | 90 | 19 | 4.087 | 120 |
| 20 | 4.665 | 58 | 20 | 3.179 | 70 | 20 | 2.564 | 78 | 20 | 2.249 | 98 | 20 | 4.547 | 120 |
| 21 | 5.002 | 60 | 21 | 3.501 | 70 | 21 | 2.867 | 80 | 21 | 2.298 | 90 | 21 | 4.892 | 120 |
| 22 | 5.131 | 62 | 22 | 3.501 | 72 | 22 | 2.867 | 82 | 22 | 2.345 | 96 | 22 | 4.967 | 118 |
| 23 | 5.131 | 58 | 23 | 3.863 | 70 | 23 | 3.264 | 84 | 23 | 2.798 | 94 | 23 | 4.967 | 122 |
| 24 | 6.065 | 60 | 24 | 3.863 | 68 | 24 | 3.264 | 80 | 24 | 2.798 | 90 | 24 | 5.311 | 120 |
| 25 | 6.065 | 62 | 25 | 4.431 | 68 | 25 | 3.501 | 82 | 25 | 3.128 | 96 | 25 | 6.065 | 120 |
| 26 | 6.132 | 58 | 26 | 4.431 | 70 | 26 | 3.913 | 80 | 26 | 3.179 | 100 | 26 | 6.532 | 135 |
| 27 | 6.132 | 60 | 27 | 4.502 | 70 | 27 | 4.087 | 80 | 27 | 3.501 | 100 | 27 | 6.532 | 130 |
| 28 | 6.998 | 62 | 28 | 4.599 | 70 | 28 | 4.198 | 85 | 28 | 3.913 | 105 | 28 | 7.465 | 130 |
| 29 | 6.998 | 60 | 29 | 4.599 | 72 | 29 | 4.198 | 80 | 29 | 4.541 | 98 | 29 | 7.465 | 135 |
| 30 | 8.178 | 60 | 30 | 5.311 | 72 | 30 | 4.665 | 80 | 30 | 4.665 | 102 | | | |
| 31 | 8.178 | 70 | 31 | 5.382 | 70 | 31 | 4.892 | 80 | 31 | 4.693 | 100 | | | |
| 32 | 9.200 | 68 | 32 | 5.598 | 72 | 32 | 5.311 | 80 | 32 | 4.892 | 100 | | | |
| | | | 33 | 5.598 | 70 | 33 | 6.410 | 88 | 33 | 5.131 | 98 | | | |
| | | | 34 | 6.532 | 80 | 34 | 7.171 | 100 | 34 | 5.131 | 105 | | | |
| | | | 35 | 6.532 | 70 | 35 | 7.340 | 98 | 35 | 5.911 | 100 | | | |
| | | | 36 | 7.830 | 80 | 36 | 7.340 | 104 | 36 | 6.532 | 110 | | | |
| | | | 37 | 8.399 | 90 | 37 | 8.178 | 110 | 37 | 6.532 | 115 | | | |
| | | | | | | 38 | 8.178 | 100 | 38 | 7.830 | 135 | | | |

TABLEAU A.4.3: Résultats des mesures des pertes de charge Série III :

| Série III : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.82$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 288 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 2.412 | 48 | 1 | 1.477 | 50 | 1 | 0.802 | 42 | 1 | 1.090 | 60 |
| 2 | 2.685 | 54 | 2 | 1.649 | 52 | 2 | 0.860 | 40 | 2 | 1.245 | 60 |
| 3 | 2.937 | 54 | 3 | 1.649 | 50 | 3 | 0.860 | 42 | 3 | 1.245 | 62 |
| 4 | 2.952 | 54 | 4 | 1.775 | 48 | 4 | 1.101 | 48 | 4 | 1.409 | 66 |
| 5 | 3.024 | 48 | 5 | 1.835 | 50 | 5 | 1.101 | 46 | 5 | 1.915 | 70 |
| 6 | 3.164 | 54 | 6 | 2.220 | 55 | 6 | 1.206 | 50 | 6 | 1.915 | 72 |
| 7 | 3.191 | 54 | 7 | 2.220 | 54 | 7 | 1.206 | 48 | 7 | 2.426 | 78 |
| 8 | 3.191 | 52 | 8 | 2.628 | 58 | 8 | 1.378 | 60 | 8 | 2.426 | 74 |
| 9 | 3.285 | 54 | 9 | 3.058 | 55 | 9 | 1.378 | 62 | 9 | 2.760 | 78 |
| 10 | 3.673 | 54 | 10 | 3.114 | 60 | 10 | 1.469 | 62 | 10 | 2.760 | 77 |
| 11 | 3.943 | 48 | 11 | 3.210 | 60 | 11 | 1.738 | 64 | 11 | 3.420 | 76 |
| 12 | 4.319 | 54 | 12 | 3.381 | 56 | 12 | 1.738 | 66 | 12 | 3.420 | 74 |
| 13 | 4.319 | 52 | 13 | 3.481 | 60 | 13 | 1.787 | 64 | 13 | 3.481 | 74 |
| 14 | 4.848 | 48 | 14 | 3.533 | 57 | 14 | 1.811 | 64 | 14 | 3.481 | 76 |
| 15 | 5.192 | 56 | 15 | 3.533 | 54 | 15 | 2.497 | 68 | 15 | 3.675 | 78 |
| 16 | 5.216 | 56 | 16 | 4.030 | 60 | 16 | 2.760 | 68 | 16 | 4.142 | 78 |
| 17 | 5.300 | 50 | 17 | 4.047 | 60 | 17 | 3.223 | 72 | 17 | 4.142 | 76 |
| 18 | 5.879 | 54 | 18 | 4.460 | 58 | 18 | 3.406 | 68 | 18 | 4.247 | 78 |
| 19 | 5.879 | 56 | 19 | 4.562 | 58 | 19 | 3.481 | 66 | 19 | 4.247 | 80 |
| 20 | 6.833 | 58 | 20 | 4.562 | 54 | 20 | 3.628 | 66 | 20 | 4.772 | 80 |
| 21 | 6.833 | 56 | 21 | 4.631 | 54 | 21 | 3.900 | 68 | 21 | 4.772 | 78 |
| | | | 22 | 4.772 | 56 | 22 | 4.047 | 70 | 22 | 4.917 | 78 |
| | | | 23 | 4.837 | 54 | 23 | 4.407 | 68 | 23 | 4.917 | 79 |
| | | | 24 | 5.132 | 58 | 24 | 4.715 | 68 | 24 | 5.586 | 80 |
| | | | 25 | 5.268 | 60 | 25 | 4.856 | 70 | 25 | 5.586 | 77 |
| | | | 26 | 5.588 | 53 | 26 | 4.927 | 70 | 26 | 5.703 | 80 |
| | | | 27 | 5.797 | 60 | 27 | 5.101 | 68 | 27 | 5.703 | 80 |
| | | | 28 | 5.797 | 58 | 28 | 5.525 | 64 | 28 | 5.703 | 78 |
| | | | 29 | 5.861 | 54 | 29 | 5.770 | 68 | 29 | 5.726 | 80 |
| | | | 30 | 5.861 | 56 | 30 | 5.861 | 70 | 30 | 5.726 | 82 |
| | | | 31 | 6.120 | 54 | 31 | 6.122 | 68 | 31 | 5.889 | 79 |
| | | | 32 | 7.903 | 60 | 32 | 6.520 | 68 | 32 | 5.889 | 78 |
| | | | 33 | 7.903 | 62 | 33 | 6.986 | 76 | 33 | 5.948 | 78 |
| | | | 34 | 8.497 | 53 | 34 | 7.804 | 82 | 34 | 5.948 | 82 |
| | | | 35 | 10.268 | 56 | 35 | 7.804 | 80 | 35 | 6.334 | 80 |
| | | | 36 | 10.268 | 58 | 36 | 9.183 | 90 | 36 | 6.520 | 78 |
| | | | 37 | 10.539 | 62 | 37 | 10.268 | 88 | 37 | 6.520 | 80 |
| | | | 38 | 10.539 | 58 | 38 | 10.268 | 92 | 38 | 6.766 | 86 |

TABLEAU A.4.4: Résultats des mesures des pertes de charge Série IV :

| Série IV : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $dp = 10 \text{ mm}$ $\varphi = 0.32$ $Hst = 60 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 0.733 | 28 | 1 | 0.572 | 38 | 1 | 0.511 | 40 | 1 | 0.668 | 58 | 1 | 0.697 | 90 |
| 2 | 0.733 | 26 | 2 | 0.699 | 44 | 2 | 0.745 | 50 | 2 | 0.955 | 72 | 2 | 0.764 | 92 |
| 3 | 0.932 | 40 | 3 | 1.142 | 46 | 3 | 0.955 | 56 | 3 | 0.955 | 74 | 3 | 0.931 | 106 |
| 4 | 0.978 | 38 | 4 | 1.179 | 48 | 4 | 1.021 | 58 | 4 | 1.166 | 84 | 4 | 0.931 | 104 |
| 5 | 1.166 | 42 | 5 | 1.223 | 48 | 5 | 1.021 | 60 | 5 | 1.400 | 94 | 5 | 1.164 | 116 |
| 6 | 1.400 | 44 | 6 | 1.277 | 47 | 6 | 1.166 | 60 | 6 | 1.400 | 92 | 6 | 1.164 | 120 |
| 7 | 1.634 | 44 | 7 | 1.434 | 48 | 7 | 1.166 | 70 | 7 | 1.533 | 98 | 7 | 1.327 | 122 |
| 8 | 1.867 | 44 | 8 | 1.498 | 50 | 8 | 1.166 | 68 | 8 | 1.713 | 100 | 8 | 1.327 | 124 |
| 9 | 2.101 | 46 | 9 | 1.634 | 49 | 9 | 1.400 | 68 | 9 | 1.867 | 104 | 9 | 1.352 | 124 |
| 10 | 2.504 | 47 | 10 | 1.656 | 48 | 10 | 1.400 | 70 | 10 | 1.867 | 106 | 10 | 1.397 | 124 |
| 11 | 2.803 | 40 | 11 | 1.656 | 50 | 11 | 1.501 | 68 | 11 | 2.003 | 110 | 11 | 1.397 | 126 |
| 12 | 2.814 | 47 | 12 | 1.867 | 54 | 12 | 1.501 | 70 | 12 | 2.153 | 110 | 12 | 1.671 | 126 |
| 13 | 2.814 | 46 | 13 | 1.867 | 52 | 13 | 1.686 | 74 | 13 | 2.335 | 110 | 13 | 1.671 | 132 |
| 14 | 3.133 | 46 | 14 | 1.914 | 54 | 14 | 1.867 | 78 | 14 | 2.335 | 108 | 14 | 1.711 | 130 |
| 15 | 3.133 | 47 | 15 | 1.914 | 56 | 15 | 1.867 | 76 | 15 | 2.449 | 110 | 15 | 1.749 | 134 |
| 16 | 3.270 | 43 | 16 | 1.967 | 60 | 16 | 2.046 | 84 | 16 | 2.632 | 108 | 16 | 1.864 | 128 |
| 17 | 3.582 | 47 | 17 | 1.967 | 58 | 17 | 2.153 | 80 | 17 | 2.632 | 110 | 17 | 1.864 | 132 |
| 18 | 4.094 | 48 | 18 | 2.101 | 64 | 18 | 2.335 | 84 | 18 | 2.803 | 108 | 18 | 1.999 | 130 |
| 19 | 4.351 | 44 | 19 | 2.101 | 66 | 19 | 2.558 | 86 | 19 | 2.907 | 112 | 19 | 2.249 | 136 |
| 20 | 4.607 | 48 | 20 | 2.393 | 70 | 20 | 2.558 | 84 | 20 | 2.907 | 108 | 20 | 2.249 | 132 |
| 21 | 4.607 | 49 | 21 | 2.814 | 68 | 21 | 2.569 | 86 | 21 | 2.939 | 110 | 21 | 2.331 | 136 |
| 22 | 5.119 | 44 | 22 | 2.814 | 70 | 22 | 3.270 | 86 | 22 | 2.939 | 114 | 22 | 2.388 | 132 |
| 23 | 5.391 | 44 | 23 | 2.939 | 70 | 23 | 3.430 | 90 | 23 | 3.316 | 112 | 23 | 2.500 | 138 |
| 24 | 5.608 | 48 | 24 | 3.070 | 70 | 24 | 3.430 | 88 | 24 | 3.507 | 110 | 24 | 3.000 | 134 |
| 25 | 5.842 | 46 | 25 | 3.070 | 72 | 25 | 3.462 | 88 | 25 | 3.582 | 110 | 25 | 3.731 | 136 |
| 26 | 5.882 | 48 | 26 | 3.675 | 70 | 26 | 3.738 | 88 | 26 | 3.582 | 114 | 26 | 3.913 | 140 |
| 27 | 5.882 | 46 | 27 | 3.675 | 68 | 27 | 3.738 | 86 | 27 | 3.675 | 110 | 27 | 3.965 | 140 |
| 28 | 6.543 | 48 | 28 | 3.758 | 70 | 28 | 3.920 | 86 | 28 | 3.675 | 114 | 28 | 3.965 | 144 |
| 29 | 6.543 | 50 | 29 | 4.673 | 72 | 29 | 4.205 | 88 | 29 | 3.830 | 112 | 29 | 4.665 | 150 |
| 30 | 7.478 | 51 | 30 | 4.673 | 74 | 30 | 4.205 | 92 | 30 | 4.094 | 116 | 30 | 4.665 | 148 |
| 31 | 7.478 | 49 | 31 | 4.673 | 70 | 31 | 4.901 | 92 | 31 | 4.094 | 112 | 31 | 5.019 | 154 |
| | | | 32 | 4.788 | 75 | 32 | 4.907 | 92 | 32 | 4.607 | 110 | 32 | 5.019 | 150 |
| | | | 33 | 4.788 | 76 | 33 | 5.146 | 94 | 33 | 4.607 | 114 | 33 | 5.598 | 150 |
| | | | 34 | 5.028 | 74 | 34 | 5.608 | 94 | 34 | 4.673 | 114 | 34 | 5.598 | 160 |
| | | | 35 | 5.028 | 72 | 35 | 5.882 | 94 | 35 | 5.608 | 120 | | | |
| | | | 36 | 5.140 | 76 | 36 | 5.882 | 90 | 36 | 6.076 | 126 | | | |
| | | | 37 | 6.076 | 74 | 37 | 6.543 | 100 | 37 | 6.127 | 130 | | | |
| | | | 38 | 6.076 | 78 | | | | 38 | 6.543 | 140 | | | |

TABLEAU A.4.5: Résultats des mesures des pertes de charge Série V :

| Série V : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 1.631 | 32 | 1 | 0.662 | 22 | 1 | 0.680 | 36 | 1 | 0.731 | 50 | 1 | 0.697 | 58 |
| 2 | 1.631 | 30 | 2 | 0.662 | 24 | 2 | 0.680 | 38 | 2 | 0.731 | 52 | 2 | 0.697 | 64 |
| 3 | 1.864 | 36 | 3 | 0.976 | 30 | 3 | 0.931 | 44 | 3 | 0.907 | 58 | 3 | 1.135 | 72 |
| 4 | 2.098 | 38 | 4 | 0.998 | 31 | 4 | 0.976 | 46 | 4 | 0.931 | 62 | 4 | 1.135 | 70 |
| 5 | 2.331 | 40 | 5 | 1.104 | 38 | 5 | 0.976 | 44 | 5 | 0.931 | 58 | 5 | 1.710 | 80 |
| 6 | 2.345 | 40 | 6 | 1.397 | 40 | 6 | 0.976 | 48 | 6 | 1.248 | 60 | 6 | 2.331 | 80 |
| 7 | 2.689 | 40 | 7 | 1.397 | 43 | 7 | 1.135 | 52 | 7 | 1.466 | 65 | 7 | 2.331 | 84 |
| 8 | 2.750 | 40 | 8 | 1.631 | 46 | 8 | 1.135 | 50 | 8 | 1.466 | 60 | 8 | 2.553 | 84 |
| 9 | 2.758 | 39 | 9 | 1.710 | 44 | 9 | 1.593 | 52 | 9 | 1.466 | 64 | 9 | 2.654 | 85 |
| 10 | 2.758 | 40 | 10 | 1.769 | 46 | 10 | 1.955 | 56 | 10 | 2.042 | 68 | 10 | 2.750 | 82 |
| 11 | 2.934 | 40 | 11 | 1.769 | 44 | 11 | 1.955 | 54 | 11 | 2.042 | 66 | 11 | 3.540 | 82 |
| 12 | 3.650 | 40 | 12 | 1.864 | 46 | 12 | 2.042 | 54 | 12 | 2.125 | 66 | 12 | 3.793 | 85 |
| 13 | 3.650 | 42 | 13 | 1.999 | 48 | 13 | 2.042 | 56 | 13 | 2.125 | 68 | 13 | 4.254 | 88 |
| 14 | 3.913 | 42 | 14 | 1.999 | 44 | 14 | 2.331 | 58 | 14 | 2.206 | 70 | 14 | 4.665 | 85 |
| 15 | 3.913 | 40 | 15 | 2.445 | 48 | 15 | 2.798 | 58 | 15 | 2.206 | 68 | 15 | 5.382 | 90 |
| 16 | 4.087 | 40 | 16 | 2.658 | 48 | 16 | 2.798 | 56 | 16 | 2.553 | 68 | 16 | 5.503 | 90 |
| 17 | 4.665 | 42 | 17 | 2.658 | 46 | 17 | 2.934 | 58 | 17 | 2.553 | 70 | 17 | 5.871 | 90 |
| 18 | 4.780 | 42 | 18 | 2.727 | 48 | 18 | 3.264 | 60 | 18 | 2.606 | 70 | 18 | 6.132 | 90 |
| 19 | 4.780 | 40 | 19 | 3.000 | 50 | 19 | 3.264 | 56 | 19 | 2.689 | 68 | 19 | 6.693 | 100 |
| 20 | 5.456 | 42 | 20 | 3.424 | 48 | 20 | 3.731 | 56 | 20 | 2.934 | 70 | 20 | 7.155 | 100 |
| 21 | 5.456 | 43 | 21 | 3.424 | 50 | 21 | 3.731 | 60 | 21 | 3.190 | 70 | 21 | 8.178 | 110 |
| 22 | 5.598 | 44 | 22 | 3.731 | 48 | 22 | 3.731 | 58 | 22 | 3.424 | 72 | 22 | 8.178 | 110 |
| 23 | 6.196 | 44 | 23 | 3.731 | 50 | 23 | 3.913 | 56 | 23 | 3.424 | 68 | | | |
| 24 | 6.196 | 42 | 24 | 4.092 | 49 | 24 | 3.913 | 60 | 24 | 3.913 | 72 | | | |
| 25 | 7.465 | 46 | 25 | 4.092 | 47 | 25 | 4.302 | 62 | 25 | 4.001 | 72 | | | |
| 26 | 7.465 | 48 | 26 | 4.302 | 48 | 26 | 4.302 | 58 | 26 | 4.254 | 72 | | | |
| | | | 27 | 4.302 | 50 | 27 | 4.403 | 58 | 27 | 4.403 | 74 | | | |
| | | | 28 | 4.425 | 48 | 28 | 4.403 | 62 | 28 | 4.431 | 70 | | | |
| | | | 29 | 4.868 | 48 | 29 | 4.665 | 62 | 29 | 5.258 | 74 | | | |
| | | | 30 | 4.868 | 50 | 30 | 4.665 | 60 | 30 | 5.258 | 70 | | | |
| | | | 31 | 5.001 | 52 | 31 | 4.780 | 60 | 31 | 6.132 | 80 | | | |
| | | | 32 | 5.754 | 50 | 32 | 5.131 | 60 | 32 | 6.532 | 75 | | | |
| | | | 33 | 5.754 | 53 | 33 | 5.871 | 64 | 33 | 7.465 | 80 | | | |
| | | | 34 | 6.065 | 50 | 34 | 6.065 | 62 | 34 | 8.319 | 90 | | | |
| | | | 35 | 6.065 | 54 | 35 | 7.465 | 70 | | | | | | |
| | | | 36 | 6.132 | 54 | 36 | 7.465 | 72 | | | | | | |
| | | | 37 | 6.132 | 52 | 37 | 8.399 | 80 | | | | | | |
| | | | 38 | 7.830 | 60 | 38 | 8.399 | 78 | | | | | | |

TABLEAU A.4.6: Résultats des mesures des pertes de charge Série VI:

| Série VI : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\varphi = 0.82$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 0.854 | 17 | 1 | 0.744 | 28 | 1 | 0.748 | 22 | 1 | 0.697 | 40 | 1 | 0.697 | 60 |
| 2 | 0.931 | 17 | 2 | 1.019 | 27 | 2 | 0.748 | 22 | 2 | 0.697 | 38 | 2 | 0.697 | 58 |
| 3 | 1.432 | 16 | 3 | 1.301 | 30 | 3 | 1.248 | 32 | 3 | 0.976 | 44 | 3 | 0.780 | 60 |
| 4 | 1.910 | 24 | 4 | 1.786 | 38 | 4 | 1.248 | 30 | 4 | 1.164 | 52 | 4 | 0.780 | 62 |
| 5 | 1.910 | 24 | 5 | 1.786 | 36 | 5 | 1.432 | 30 | 5 | 1.164 | 48 | 5 | 0.791 | 60 |
| 6 | 2.331 | 27 | 6 | 2.500 | 34 | 6 | 1.466 | 34 | 6 | 1.377 | 50 | 6 | 0.931 | 60 |
| 7 | 2.331 | 26 | 7 | 3.106 | 37 | 7 | 1.466 | 32 | 7 | 1.377 | 52 | 7 | 1.221 | 66 |
| 8 | 2.345 | 20 | 8 | 3.106 | 36 | 8 | 1.955 | 32 | 8 | 1.631 | 54 | 8 | 1.221 | 64 |
| 9 | 2.606 | 20 | 9 | 3.913 | 34 | 9 | 1.955 | 33 | 9 | 1.631 | 50 | 9 | 1.531 | 60 |
| 10 | 3.031 | 26 | 10 | 3.913 | 36 | 10 | 2.098 | 38 | 10 | 1.631 | 52 | 10 | 1.671 | 66 |
| 11 | 3.031 | 27 | 11 | 5.110 | 38 | 11 | 2.098 | 36 | 11 | 2.331 | 54 | 11 | 1.671 | 60 |
| 12 | 5.598 | 30 | 12 | 5.110 | 37 | 12 | 2.388 | 30 | 12 | 2.331 | 50 | 12 | 1.864 | 58 |
| 13 | 5.598 | 28 | 13 | 6.298 | 38 | 13 | 2.445 | 34 | 13 | 2.392 | 48 | 13 | 1.864 | 60 |
| | | | 14 | 6.298 | 34 | 14 | 2.445 | 32 | 14 | 2.392 | 50 | 14 | 1.910 | 62 |
| | | | 15 | 6.298 | 39 | 15 | 3.128 | 34 | 15 | 2.445 | 50 | 15 | 1.910 | 60 |
| | | | 16 | 6.298 | 36 | 16 | 3.128 | 35 | 16 | 2.445 | 48 | 16 | 2.331 | 62 |
| | | | 17 | 6.532 | 33 | 17 | 3.424 | 39 | 17 | 2.798 | 53 | 17 | 2.331 | 60 |
| | | | 18 | 6.532 | 35 | 18 | 3.424 | 40 | 18 | 2.798 | 48 | 18 | 2.564 | 60 |
| | | | 19 | 7.155 | 40 | 19 | 3.424 | 38 | 19 | 2.798 | 54 | 19 | 2.564 | 64 |
| | | | | | | 20 | 3.731 | 40 | 20 | 2.798 | 52 | 20 | 2.867 | 64 |
| | | | | | | 21 | 3.731 | 38 | 21 | 3.264 | 52 | 21 | 2.867 | 62 |
| | | | | | | 22 | 4.898 | 40 | 22 | 3.264 | 50 | 22 | 3.128 | 68 |
| | | | | | | 23 | 5.598 | 40 | 23 | 3.424 | 52 | 23 | 3.731 | 60 |
| | | | | | | 24 | 6.065 | 40 | 24 | 3.424 | 54 | 24 | 3.731 | 62 |
| | | | | | | 25 | 8.319 | 44 | 25 | 3.731 | 52 | 25 | 3.731 | 64 |
| | | | | | | 26 | 8.319 | 42 | 26 | 3.731 | 50 | 26 | 4.087 | 68 |
| | | | | | | | | | 27 | 4.665 | 54 | 27 | 4.665 | 68 |
| | | | | | | | | | 28 | 4.665 | 52 | 28 | 4.665 | 66 |
| | | | | | | | | | 29 | 5.598 | 54 | 29 | 4.892 | 70 |
| | | | | | | | | | 30 | 5.598 | 56 | 30 | 4.892 | 74 |
| | | | | | | | | | 31 | 5.598 | 58 | 31 | 5.131 | 77 |
| | | | | | | | | | 32 | 5.832 | 54 | 32 | 5.131 | 76 |
| | | | | | | | | | 33 | 5.832 | 58 | 33 | 5.598 | 76 |
| | | | | | | | | | 34 | 6.532 | 60 | 34 | 5.598 | 80 |
| | | | | | | | | | 35 | 6.532 | 58 | 35 | 5.598 | 68 |
| | | | | | | | | | | | | 36 | 5.832 | 84 |
| | | | | | | | | | | | | 37 | 5.832 | 80 |
| | | | | | | | | | | | | 38 | 6.532 | 90 |

TABLEAU A.4.7: Résultats des mesures des pertes de charge Série VII:

| Série VII : $\rho p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $dp = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.32$ $Hst = 120 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 0.558 | 14 | 1 | 0.569 | 41 | 1 | 0.699 | 65 | 1 | 0.569 | 47 | 1 | 0.476 | 100 |
| 2 | 0.558 | 13 | 2 | 0.765 | 45 | 2 | 0.699 | 62 | 2 | 0.699 | 84 | 2 | 0.652 | 122 |
| 3 | 0.599 | 22 | 3 | 0.911 | 50 | 3 | 0.932 | 75 | 3 | 0.699 | 87 | 3 | 0.667 | 115 |
| 4 | 0.652 | 14 | 4 | 0.932 | 52 | 4 | 0.932 | 80 | 4 | 0.699 | 85 | 4 | 0.699 | 115 |
| 5 | 0.765 | 22 | 5 | 0.932 | 62 | 5 | 0.932 | 76 | 5 | 0.826 | 92 | 5 | 0.717 | 120 |
| 6 | 0.932 | 40 | 6 | 1.042 | 65 | 6 | 1.142 | 88 | 6 | 0.826 | 86 | 6 | 0.745 | 128 |
| 7 | 1.318 | 44 | 7 | 1.166 | 68 | 7 | 1.190 | 82 | 7 | 0.973 | 100 | 7 | 0.745 | 124 |
| 8 | 1.400 | 56 | 8 | 1.233 | 73 | 8 | 1.223 | 88 | 8 | 1.021 | 100 | 8 | 0.932 | 130 |
| 9 | 1.863 | 57 | 9 | 1.233 | 70 | 9 | 1.223 | 90 | 9 | 1.063 | 98 | 9 | 0.932 | 135 |
| 10 | 1.863 | 64 | 10 | 1.367 | 78 | 10 | 1.400 | 94 | 10 | 1.063 | 107 | 10 | 0.955 | 140 |
| 11 | 1.867 | 57 | 11 | 1.468 | 82 | 11 | 1.533 | 94 | 11 | 1.318 | 125 | 11 | 0.955 | 135 |
| 12 | 1.867 | 64 | 12 | 1.636 | 78 | 12 | 1.533 | 98 | 12 | 1.318 | 120 | 12 | 1.166 | 146 |
| 13 | 1.959 | 68 | 13 | 1.852 | 80 | 13 | 1.565 | 100 | 13 | 1.634 | 140 | 13 | 1.195 | 140 |
| 14 | 2.530 | 63 | 14 | 1.867 | 84 | 14 | 1.634 | 102 | 14 | 2.046 | 140 | 14 | 1.195 | 150 |
| 15 | 2.780 | 67 | 15 | 2.210 | 84 | 15 | 1.867 | 100 | 15 | 2.287 | 147 | 15 | 1.501 | 155 |
| 16 | 2.780 | 60 | 16 | 2.287 | 92 | 16 | 1.867 | 104 | 16 | 2.287 | 145 | 16 | 1.501 | 170 |
| 17 | 2.803 | 70 | 17 | 2.470 | 95 | 17 | 2.003 | 104 | 17 | 2.399 | 140 | 17 | 1.634 | 170 |
| 18 | 3.432 | 71 | 18 | 2.470 | 98 | 18 | 2.003 | 110 | 18 | 2.803 | 145 | 18 | 1.867 | 170 |
| 19 | 3.545 | 67 | 19 | 2.632 | 94 | 19 | 2.287 | 122 | 19 | 2.803 | 140 | 19 | 2.235 | 170 |
| 20 | 3.729 | 78 | 20 | 2.803 | 96 | 20 | 2.287 | 112 | 20 | 2.803 | 147 | 20 | 2.505 | 170 |
| 21 | 3.729 | 73 | 21 | 2.803 | 98 | 21 | 2.335 | 124 | 21 | 3.133 | 145 | 21 | 2.611 | 170 |
| 22 | 3.738 | 70 | 22 | 2.939 | 100 | 22 | 2.803 | 120 | 22 | 3.133 | 140 | 22 | 2.770 | 168 |
| 23 | 3.738 | 76 | 23 | 2.999 | 102 | 23 | 2.872 | 122 | 23 | 3.256 | 140 | 23 | 2.803 | 170 |
| 24 | 4.205 | 73 | 24 | 3.270 | 108 | 24 | 2.872 | 125 | 24 | 3.256 | 145 | 24 | 2.872 | 170 |
| 25 | 4.578 | 75 | 25 | 3.288 | 100 | 25 | 3.146 | 128 | 25 | 3.738 | 140 | 25 | 3.432 | 165 |
| 26 | 4.673 | 75 | 26 | 3.738 | 104 | 26 | 3.146 | 125 | 26 | 3.830 | 140 | 26 | 3.738 | 175 |
| 27 | 4.673 | 73 | 27 | 3.738 | 108 | 27 | 3.489 | 126 | 27 | 3.830 | 145 | 27 | 3.738 | 170 |
| 28 | 4.788 | 70 | 28 | 3.920 | 108 | 28 | 4.008 | 125 | 28 | 4.008 | 145 | 28 | 3.869 | 170 |
| 29 | 4.788 | 72 | 29 | 4.262 | 106 | 29 | 4.578 | 126 | 29 | 4.008 | 140 | 29 | 4.005 | 170 |
| 30 | 5.224 | 76 | 30 | 4.673 | 108 | 30 | 5.140 | 122 | 30 | 4.343 | 145 | 30 | 4.262 | 170 |
| 31 | 5.608 | 75 | 31 | 4.901 | 110 | 31 | 5.529 | 132 | 31 | 4.343 | 150 | 31 | 4.411 | 170 |
| 32 | 5.608 | 77 | 32 | 4.901 | 104 | 32 | 5.529 | 124 | 32 | 4.788 | 145 | 32 | 4.673 | 170 |
| 33 | 7.460 | 80 | 33 | 5.119 | 104 | 33 | 5.608 | 130 | 33 | 4.788 | 140 | 33 | 4.901 | 170 |
| 34 | 7.478 | 84 | 34 | 5.608 | 110 | 34 | 5.608 | 125 | 34 | 5.328 | 145 | 34 | 5.140 | 170 |
| 35 | 7.478 | 80 | 35 | 6.143 | 108 | 35 | 6.076 | 130 | 35 | 5.429 | 145 | 35 | 5.328 | 170 |
| 36 | 8.526 | 85 | 36 | 6.309 | 112 | 36 | 6.608 | 135 | 36 | 5.608 | 145 | 36 | 5.608 | 170 |
| 37 | 8.526 | 87 | 37 | 6.543 | 104 | 37 | 8.094 | 135 | 37 | 5.746 | 145 | 37 | 5.973 | 170 |
| 38 | 8.824 | 90 | 38 | 7.478 | 110 | 38 | 8.526 | 140 | | | | 38 | 6.143 | 185 |

TABLEAU A.4.8: Résultats des mesures des pertes de charge Série VIII:

| Série VIII : $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $Hst = 120 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² s | | | L = 10.23 Kg/m ² s | | | L = 15.84 Kg/m ² s | | | L = 20.94 Kg/m ² s | | | L = 27.90 Kg/m ² s | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 1.667 | 17 | 1 | 0.696 | 6 | 1 | 0.696 | 16 | 1 | 0.559 | 20 | 1 | 0.487 | 48 |
| 2 | 1.710 | 12 | 2 | 0.794 | 14 | 2 | 0.696 | 10 | 2 | 0.662 | 38 | 2 | 0.624 | 66 |
| 3 | 1.710 | 14 | 3 | 0.794 | 12 | 3 | 0.696 | 20 | 3 | 0.662 | 40 | 3 | 0.697 | 60 |
| 4 | 1.910 | 20 | 4 | 0.877 | 10 | 4 | 0.696 | 14 | 4 | 0.731 | 34 | 4 | 0.697 | 68 |
| 5 | 1.930 | 18 | 5 | 0.929 | 10 | 5 | 0.881 | 26 | 5 | 0.731 | 32 | 5 | 0.697 | 72 |
| 6 | 2.098 | 30 | 6 | 0.929 | 20 | 6 | 0.929 | 34 | 6 | 0.764 | 34 | 6 | 0.883 | 80 |
| 7 | 2.249 | 52 | 7 | 1.162 | 40 | 7 | 0.929 | 32 | 7 | 0.764 | 36 | 7 | 0.931 | 80 |
| 8 | 2.249 | 55 | 8 | 1.162 | 42 | 8 | 0.929 | 30 | 8 | 0.931 | 46 | 8 | 0.931 | 86 |
| 9 | 2.553 | 62 | 9 | 1.395 | 34 | 9 | 1.102 | 40 | 9 | 0.931 | 48 | 9 | 0.954 | 90 |
| 10 | 2.553 | 60 | 10 | 1.395 | 50 | 10 | 1.162 | 52 | 10 | 0.976 | 58 | 10 | 1.104 | 98 |
| 11 | 2.658 | 52 | 11 | 1.395 | 54 | 11 | 1.323 | 50 | 11 | 1.164 | 60 | 11 | 1.221 | 100 |
| 12 | 2.658 | 54 | 12 | 1.395 | 48 | 12 | 1.395 | 80 | 12 | 1.164 | 82 | 12 | 1.326 | 100 |
| 13 | 2.798 | 72 | 13 | 1.628 | 76 | 13 | 1.469 | 60 | 13 | 1.164 | 64 | 13 | 1.326 | 104 |
| 14 | 2.798 | 70 | 14 | 1.628 | 72 | 14 | 1.561 | 90 | 14 | 1.221 | 78 | 14 | 1.397 | 104 |
| 15 | 3.031 | 70 | 15 | 1.861 | 78 | 15 | 1.628 | 90 | 15 | 1.221 | 76 | 15 | 1.710 | 104 |
| 16 | 3.031 | 74 | 16 | 1.861 | 80 | 16 | 1.628 | 88 | 16 | 1.397 | 90 | 16 | 2.042 | 100 |
| 17 | 3.913 | 72 | 17 | 1.861 | 82 | 17 | 1.746 | 82 | 17 | 1.710 | 90 | 17 | 2.149 | 110 |
| 18 | 3.913 | 78 | 18 | 2.245 | 78 | 18 | 1.746 | 88 | 18 | 1.955 | 90 | 18 | 2.758 | 108 |
| 19 | 3.913 | 74 | 19 | 2.245 | 80 | 19 | 1.861 | 90 | 19 | 1.955 | 100 | 19 | 3.913 | 110 |
| 20 | 3.913 | 66 | 20 | 2.440 | 82 | 20 | 1.952 | 84 | 20 | 2.166 | 100 | 20 | 4.087 | 110 |
| 21 | 4.001 | 74 | 21 | 2.440 | 78 | 21 | 2.039 | 86 | 21 | 2.166 | 96 | 21 | 4.665 | 110 |
| 22 | 4.001 | 70 | 22 | 2.745 | 78 | 22 | 2.685 | 86 | 22 | 2.750 | 96 | 22 | 4.780 | 115 |
| 23 | 4.892 | 76 | 23 | 2.745 | 82 | 23 | 2.793 | 88 | 23 | 2.798 | 98 | 23 | 4.780 | 110 |
| 24 | 4.892 | 72 | 24 | 2.793 | 84 | 24 | 3.059 | 90 | 24 | 2.798 | 90 | 24 | 5.131 | 115 |
| 25 | 4.892 | 74 | 25 | 2.793 | 78 | 25 | 3.059 | 80 | 25 | 3.369 | 90 | 25 | 5.131 | 120 |
| 26 | 5.598 | 76 | 26 | 3.173 | 78 | 26 | 3.259 | 78 | 26 | 3.369 | 96 | 26 | 5.311 | 118 |
| 27 | 5.598 | 74 | 27 | 3.173 | 82 | 27 | 3.725 | 80 | 27 | 3.965 | 100 | 27 | 5.311 | 110 |
| 28 | 5.598 | 70 | 28 | 3.662 | 80 | 28 | 3.906 | 80 | 28 | 3.965 | 90 | 28 | 6.022 | 115 |
| 29 | 5.598 | 80 | 29 | 3.906 | 80 | 29 | 3.906 | 90 | 29 | 4.198 | 90 | 29 | 6.022 | 122 |
| 30 | 5.871 | 70 | 30 | 4.657 | 82 | 30 | 4.425 | 80 | 30 | 4.665 | 90 | 30 | 6.532 | 125 |
| 31 | 5.871 | 68 | 31 | 4.657 | 80 | 31 | 4.994 | 80 | 31 | 4.665 | 100 | 31 | 6.532 | 115 |
| 32 | 6.532 | 80 | 32 | 5.821 | 78 | 32 | 5.123 | 88 | 32 | 5.598 | 100 | 32 | 6.998 | 120 |
| 33 | 6.532 | 70 | 33 | 5.821 | 80 | 33 | 5.726 | 80 | 33 | 5.598 | 96 | 33 | 6.998 | 130 |
| 34 | 7.465 | 78 | 34 | 6.054 | 85 | 34 | 6.520 | 100 | 34 | 5.621 | 100 | 34 | 7.465 | 140 |
| 35 | 7.465 | 80 | 35 | 6.520 | 80 | 35 | 6.986 | 94 | 35 | 6.003 | 102 | 35 | 7.465 | 130 |
| 36 | 8.178 | 77 | 36 | 6.520 | 82 | 36 | 6.986 | 88 | 36 | 6.003 | 94 | | | |
| 37 | 9.200 | 78 | 37 | 7.918 | 80 | 37 | 8.163 | 96 | 37 | 6.532 | 102 | | | |
| | | | 38 | 7.918 | 90 | 38 | 8.163 | 98 | 38 | 6.532 | 98 | | | |

TABLEAU A.4.10: Résultats des mesures des pertes de charge Série XI :

| Série XI : $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | |
| N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP |
| | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] |
| 1 | 1.859 | 27 | 1 | 0.931 | 12 | 1 | 0.680 | 12 | 1 | 0.697 | 32 | 1 | 0.464 | 24 |
| 2 | 1.859 | 28 | 2 | 1.061 | 13 | 2 | 0.731 | 20 | 2 | 0.697 | 30 | 2 | 0.464 | 28 |
| 3 | 2.098 | 40 | 3 | 1.104 | 13 | 3 | 0.954 | 28 | 3 | 0.931 | 42 | 3 | 0.624 | 50 |
| 4 | 2.098 | 38 | 4 | 1.104 | 20 | 4 | 0.954 | 29 | 4 | 0.931 | 44 | 4 | 0.624 | 56 |
| 5 | 2.331 | 50 | 5 | 1.104 | 20 | 5 | 1.164 | 40 | 5 | 0.976 | 30 | 5 | 0.680 | 50 |
| 6 | 2.331 | 54 | 6 | 1.426 | 39 | 6 | 1.164 | 38 | 6 | 1.061 | 40 | 6 | 0.907 | 57 |
| 7 | 2.482 | 53 | 7 | 1.426 | 40 | 7 | 1.221 | 54 | 7 | 1.061 | 44 | 7 | 0.907 | 58 |
| 8 | 2.798 | 56 | 8 | 1.593 | 50 | 8 | 1.397 | 54 | 8 | 1.164 | 60 | 8 | 0.931 | 74 |
| 9 | 2.798 | 50 | 9 | 1.593 | 52 | 9 | 1.397 | 52 | 9 | 1.164 | 58 | 9 | 1.140 | 78 |
| 10 | 3.127 | 54 | 10 | 1.646 | 45 | 10 | 1.624 | 72 | 10 | 1.327 | 70 | 10 | 1.164 | 80 |
| 11 | 3.576 | 58 | 11 | 1.646 | 44 | 11 | 1.631 | 66 | 11 | 1.327 | 78 | 11 | 1.164 | 76 |
| 12 | 3.576 | 57 | 12 | 1.711 | 52 | 12 | 1.864 | 60 | 12 | 1.531 | 74 | 12 | 1.221 | 78 |
| 13 | 3.731 | 53 | 13 | 1.711 | 54 | 13 | 1.864 | 64 | 13 | 1.531 | 70 | 13 | 1.221 | 80 |
| 14 | 3.731 | 56 | 14 | 1.864 | 65 | 14 | 1.955 | 72 | 14 | 2.166 | 70 | 14 | 1.397 | 82 |
| 15 | 4.302 | 60 | 15 | 1.864 | 60 | 15 | 1.955 | 68 | 15 | 2.166 | 80 | 15 | 1.397 | 78 |
| 16 | 4.302 | 57 | 16 | 1.864 | 46 | 16 | 2.445 | 68 | 16 | 2.553 | 80 | 16 | 1.466 | 78 |
| 17 | 4.599 | 58 | 17 | 1.864 | 52 | 17 | 2.934 | 72 | 17 | 2.553 | 70 | 17 | 1.531 | 80 |
| 18 | 4.665 | 62 | 18 | 2.098 | 60 | 18 | 2.934 | 68 | 18 | 2.708 | 70 | 18 | 1.864 | 80 |
| 19 | 4.665 | 60 | 19 | 2.331 | 64 | 19 | 2.934 | 60 | 19 | 2.708 | 72 | 19 | 1.864 | 86 |
| 20 | 4.665 | 58 | 20 | 2.331 | 70 | 20 | 2.934 | 70 | 20 | 3.000 | 75 | 20 | 1.864 | 84 |
| 21 | 4.793 | 60 | 21 | 2.388 | 62 | 21 | 3.731 | 70 | 21 | 3.264 | 74 | 21 | 1.999 | 80 |
| 22 | 4.793 | 57 | 22 | 2.388 | 60 | 22 | 3.731 | 60 | 22 | 3.264 | 76 | 22 | 2.331 | 82 |
| 23 | 5.131 | 57 | 23 | 2.934 | 60 | 23 | 4.254 | 70 | 23 | 3.501 | 80 | 23 | 2.798 | 80 |
| 24 | 5.131 | 58 | 24 | 2.934 | 66 | 24 | 4.254 | 72 | 24 | 3.501 | 70 | 24 | 3.065 | 86 |
| 25 | 5.131 | 59 | 25 | 3.913 | 64 | 25 | 4.302 | 66 | 25 | 3.731 | 70 | 25 | 3.731 | 88 |
| 26 | 6.298 | 56 | 26 | 3.913 | 58 | 26 | 4.665 | 70 | 26 | 3.731 | 80 | 26 | 4.087 | 86 |
| 27 | 6.532 | 58 | 27 | 4.001 | 58 | 27 | 4.892 | 72 | 27 | 3.751 | 76 | 27 | 4.198 | 92 |
| 28 | 6.532 | 56 | 28 | 4.001 | 62 | 28 | 4.892 | 70 | 28 | 3.751 | 70 | 28 | 4.198 | 86 |
| 29 | 6.850 | 58 | 29 | 4.431 | 66 | 29 | 5.598 | 70 | 29 | 4.198 | 70 | 29 | 5.110 | 94 |
| 30 | 6.850 | 62 | 30 | 4.431 | 60 | 30 | 5.598 | 72 | 30 | 4.198 | 80 | 30 | 5.131 | 96 |
| 31 | 6.998 | 60 | 31 | 4.665 | 60 | 31 | 6.065 | 70 | 31 | 4.254 | 80 | 31 | 5.131 | 90 |
| 32 | 6.998 | 58 | 32 | 4.665 | 62 | 32 | 6.532 | 78 | 32 | 4.254 | 78 | 32 | 5.311 | 90 |
| 33 | 7.465 | 58 | 33 | 4.892 | 68 | 33 | 6.532 | 70 | 33 | 4.892 | 70 | 33 | 5.311 | 92 |
| 34 | 7.465 | 60 | 34 | 5.110 | 64 | 34 | 6.532 | 72 | 34 | 4.892 | 80 | 34 | 5.598 | 90 |
| 35 | 9.200 | 62 | 35 | 5.598 | 70 | 35 | 7.699 | 80 | 35 | 5.002 | 80 | 35 | 5.754 | 94 |
| 36 | 9.200 | 60 | 36 | 5.832 | 64 | 36 | 7.699 | 70 | 36 | 5.002 | 70 | 36 | 5.832 | 96 |
| | | | 37 | 8.178 | 70 | | | | 37 | 5.598 | 80 | 37 | 6.532 | 100 |
| | | | 38 | 8.809 | 70 | | | | 38 | 5.598 | 78 | | | |

TABLEAU A.4.11: Résultats des mesures des pertes de charge Série XIII :

| Série XIII : $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.32$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | |
| N° | G [Kg/m ² .s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² .s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² .s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² .s] | ΔP [mm.CE] | N° | G [Kg/m ² .s] | ΔP [mm.CE] |
| 1 | 0.932 | 24 | 1 | 0.733 | 32 | 1 | 0.699 | 42 | 1 | 0.796 | 54 | 1 | 0.663 | 66 |
| 2 | 0.932 | 22 | 2 | 0.796 | 38 | 2 | 0.745 | 47 | 2 | 0.796 | 56 | 2 | 0.663 | 70 |
| 3 | 0.955 | 19 | 3 | 0.911 | 36 | 3 | 0.816 | 48 | 3 | 0.911 | 62 | 3 | 0.699 | 70 |
| 4 | 0.978 | 20 | 4 | 0.932 | 34 | 4 | 0.816 | 49 | 4 | 0.911 | 58 | 4 | 0.699 | 68 |
| 5 | 0.978 | 21 | 5 | 0.932 | 38 | 5 | 0.839 | 48 | 5 | 1.000 | 62 | 5 | 0.932 | 76 |
| 6 | 1.233 | 24 | 6 | 1.195 | 38 | 6 | 1.000 | 46 | 6 | 1.000 | 60 | 6 | 0.978 | 86 |
| 7 | 1.233 | 22 | 7 | 1.400 | 40 | 7 | 1.021 | 50 | 7 | 1.166 | 70 | 7 | 0.978 | 84 |
| 8 | 1.400 | 30 | 8 | 1.626 | 46 | 8 | 1.142 | 50 | 8 | 1.250 | 68 | 8 | 1.318 | 92 |
| 9 | 1.771 | 28 | 9 | 2.153 | 54 | 9 | 1.166 | 54 | 9 | 1.250 | 70 | 9 | 1.400 | 96 |
| 10 | 1.788 | 30 | 10 | 2.204 | 53 | 10 | 1.166 | 50 | 10 | 1.285 | 72 | 10 | 1.400 | 104 |
| 11 | 1.790 | 34 | 11 | 2.393 | 48 | 11 | 1.223 | 51 | 11 | 1.285 | 70 | 11 | 1.634 | 108 |
| 12 | 1.959 | 36 | 12 | 2.803 | 54 | 12 | 1.752 | 60 | 12 | 1.400 | 76 | 12 | 1.656 | 110 |
| 13 | 1.980 | 32 | 13 | 2.929 | 58 | 13 | 1.752 | 64 | 13 | 1.400 | 78 | 13 | 1.656 | 106 |
| 14 | 2.399 | 34 | 14 | 2.929 | 56 | 14 | 1.867 | 64 | 14 | 1.656 | 82 | 14 | 2.053 | 110 |
| 15 | 2.399 | 32 | 15 | 3.070 | 58 | 15 | 2.129 | 68 | 15 | 1.656 | 84 | 15 | 2.053 | 108 |
| 16 | 2.569 | 36 | 16 | 3.256 | 59 | 16 | 2.129 | 70 | 16 | 2.003 | 88 | 16 | 2.101 | 116 |
| 17 | 3.195 | 30 | 17 | 3.256 | 58 | 17 | 2.335 | 70 | 17 | 2.003 | 90 | 17 | 2.287 | 118 |
| 18 | 3.256 | 36 | 18 | 3.270 | 62 | 18 | 2.803 | 73 | 18 | 2.204 | 90 | 18 | 2.287 | 116 |
| 19 | 3.351 | 37 | 19 | 3.270 | 60 | 19 | 3.070 | 72 | 19 | 2.803 | 86 | 19 | 2.505 | 118 |
| 20 | 3.830 | 32 | 20 | 3.582 | 58 | 20 | 3.133 | 74 | 20 | 2.803 | 90 | 20 | 2.569 | 122 |
| 21 | 4.061 | 34 | 21 | 3.582 | 60 | 21 | 3.504 | 74 | 21 | 2.803 | 94 | 21 | 3.070 | 120 |
| 22 | 4.061 | 36 | 22 | 3.675 | 57 | 22 | 3.582 | 73 | 22 | 2.803 | 88 | 22 | 3.256 | 120 |
| 23 | 4.262 | 32 | 23 | 3.738 | 56 | 23 | 3.920 | 74 | 23 | 3.256 | 88 | 23 | 3.432 | 120 |
| 24 | 4.411 | 34 | 24 | 3.738 | 58 | 24 | 3.920 | 72 | 24 | 3.351 | 92 | 24 | 3.432 | 130 |
| 25 | 4.411 | 36 | 25 | 3.830 | 58 | 25 | 4.094 | 72 | 25 | 3.351 | 88 | 25 | 3.738 | 128 |
| 26 | 4.579 | 32 | 26 | 4.411 | 56 | 26 | 4.205 | 72 | 26 | 3.869 | 92 | 26 | 3.738 | 130 |
| 27 | 4.673 | 38 | 27 | 4.439 | 54 | 27 | 4.673 | 76 | 27 | 3.869 | 90 | 27 | 3.971 | 124 |
| 28 | 5.224 | 30 | 28 | 4.673 | 54 | 28 | 4.673 | 74 | 28 | 3.920 | 88 | 28 | 3.971 | 120 |
| 29 | 5.328 | 38 | 29 | 4.673 | 58 | 29 | 4.673 | 78 | 29 | 3.920 | 96 | 29 | 4.094 | 124 |
| 30 | 6.076 | 36 | 30 | 4.795 | 54 | 30 | 4.673 | 77 | 30 | 4.205 | 90 | 30 | 4.094 | 128 |
| 31 | 6.076 | 38 | 31 | 5.140 | 56 | 31 | 4.907 | 76 | 31 | 4.673 | 96 | 31 | 4.205 | 128 |
| 32 | 6.705 | 35 | 32 | 5.140 | 58 | 32 | 5.140 | 74 | 32 | 4.673 | 88 | 32 | 4.578 | 122 |
| 33 | 6.705 | 34 | 33 | 5.608 | 54 | 33 | 5.140 | 76 | 33 | 4.673 | 98 | 33 | 4.901 | 130 |
| 34 | 7.478 | 36 | 34 | 6.543 | 62 | 34 | 6.076 | 80 | 34 | 5.140 | 92 | 34 | 5.140 | 132 |
| 35 | 7.478 | 38 | 35 | 6.543 | 64 | 35 | 6.076 | 84 | 35 | 5.140 | 96 | 35 | 5.608 | 140 |
| 36 | 8.413 | 36 | 36 | 7.843 | 64 | 36 | 6.543 | 90 | 36 | 6.076 | 100 | 36 | 6.076 | 154 |
| 37 | 8.413 | 38 | 37 | 7.843 | 60 | 37 | 7.478 | 96 | 37 | 6.143 | 100 | 37 | 6.076 | 148 |
| 38 | 9.955 | 44 | | | | 38 | 7.478 | 102 | 38 | 6.543 | 120 | 38 | 6.777 | 170 |

TABLEAU A.4.12: Résultats des mesures des pertes de charge Série XIV :

| Série XIV : $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | |
| N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP |
| | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] |
| 1 | 1.330 | 6 | 1 | 1.021 | 6 | 1 | 0.699 | 14 | 1 | 0.733 | 28 | 1 | 0.465 | 36 |
| 2 | 1.434 | 8 | 2 | 1.021 | 8 | 2 | 0.699 | 15 | 2 | 0.733 | 30 | 2 | 0.465 | 34 |
| 3 | 1.713 | 10 | 3 | 1.380 | 14 | 3 | 0.955 | 24 | 3 | 0.932 | 36 | 3 | 0.663 | 50 |
| 4 | 1.867 | 14 | 4 | 1.380 | 12 | 4 | 0.955 | 22 | 4 | 0.932 | 34 | 4 | 0.663 | 46 |
| 5 | 1.867 | 16 | 5 | 1.565 | 22 | 5 | 1.106 | 36 | 5 | 1.400 | 60 | 5 | 0.781 | 46 |
| 6 | 2.101 | 28 | 6 | 1.565 | 24 | 6 | 1.106 | 38 | 6 | 1.634 | 64 | 6 | 0.781 | 52 |
| 7 | 2.335 | 32 | 7 | 1.867 | 39 | 7 | 1.328 | 44 | 7 | 2.101 | 68 | 7 | 0.932 | 60 |
| 8 | 2.335 | 33 | 8 | 1.867 | 38 | 8 | 1.328 | 40 | 8 | 2.803 | 70 | 8 | 0.932 | 58 |
| 9 | 2.803 | 37 | 9 | 2.204 | 42 | 9 | 1.634 | 48 | 9 | 3.005 | 68 | 9 | 1.166 | 60 |
| 10 | 2.803 | 36 | 10 | 2.204 | 44 | 10 | 1.634 | 50 | 10 | 3.005 | 70 | 10 | 1.166 | 64 |
| 11 | 3.270 | 40 | 11 | 2.335 | 46 | 11 | 1.867 | 52 | 11 | 3.185 | 72 | 11 | 1.400 | 68 |
| 12 | 3.920 | 42 | 12 | 2.335 | 44 | 12 | 1.914 | 48 | 12 | 3.185 | 70 | 12 | 1.713 | 70 |
| 13 | 3.920 | 40 | 13 | 2.449 | 40 | 13 | 1.914 | 50 | 13 | 3.351 | 70 | 13 | 2.153 | 70 |
| 14 | 4.901 | 40 | 14 | 2.449 | 44 | 14 | 2.335 | 53 | 14 | 3.920 | 70 | 14 | 3.005 | 68 |
| 15 | 4.901 | 42 | 15 | 2.814 | 46 | 15 | 2.335 | 50 | 15 | 4.205 | 70 | 15 | 3.005 | 72 |
| 16 | 5.608 | 42 | 16 | 2.814 | 40 | 16 | 2.611 | 50 | 16 | 5.391 | 76 | 16 | 3.036 | 70 |
| 17 | 5.608 | 40 | 17 | 3.036 | 44 | 17 | 2.611 | 54 | 17 | 5.746 | 70 | 17 | 3.375 | 65 |
| 18 | 7.168 | 44 | 18 | 3.036 | 48 | 18 | 3.070 | 55 | 18 | 7.017 | 72 | 18 | 3.430 | 70 |
| 19 | 7.168 | 46 | 19 | 3.351 | 50 | 19 | 3.070 | 50 | | | | 19 | 3.430 | 66 |
| 20 | 8.192 | 48 | 20 | 3.351 | 46 | 20 | 3.256 | 50 | | | | 20 | 3.920 | 70 |
| 21 | 8.192 | 46 | 21 | 3.920 | 44 | 21 | 3.256 | 53 | | | | 21 | 3.920 | 72 |
| | | | 22 | 3.920 | 46 | 22 | 3.504 | 54 | | | | 22 | 4.607 | 68 |
| | | | 23 | 4.259 | 48 | 23 | 3.504 | 48 | | | | 23 | 4.607 | 66 |
| | | | 24 | 4.259 | 46 | 24 | 3.920 | 50 | | | | 24 | 5.011 | 70 |
| | | | 25 | 4.343 | 44 | 25 | 3.920 | 54 | | | | 25 | 5.011 | 72 |
| | | | 26 | 4.343 | 46 | 26 | 4.411 | 50 | | | | 26 | 5.512 | 70 |
| | | | 27 | 4.655 | 50 | 27 | 4.411 | 52 | | | | 27 | 5.512 | 68 |
| | | | 28 | 4.655 | 44 | 28 | 4.788 | 50 | | | | 28 | 5.746 | 70 |
| | | | 29 | 5.320 | 48 | 29 | 4.788 | 56 | | | | 29 | 6.076 | 70 |
| | | | 30 | 5.320 | 50 | 30 | 5.267 | 50 | | | | 30 | 6.543 | 68 |
| | | | 31 | 5.746 | 50 | 31 | 5.746 | 50 | | | | 31 | 6.543 | 72 |
| | | | 32 | 5.746 | 48 | 32 | 5.746 | 56 | | | | 32 | 6.862 | 80 |
| | | | 33 | 6.394 | 48 | 33 | 5.764 | 56 | | | | 33 | 6.862 | 76 |
| | | | 34 | 6.394 | 50 | 34 | 5.764 | 54 | | | | 34 | 7.011 | 80 |
| | | | 35 | 6.543 | 50 | 35 | 6.076 | 56 | | | | 35 | 7.843 | 92 |
| | | | 36 | 6.543 | 48 | 36 | 6.076 | 58 | | | | 36 | 7.843 | 90 |
| | | | 37 | 7.478 | 54 | 37 | 8.192 | 66 | | | | | | |
| | | | 38 | 7.478 | 50 | 38 | 8.192 | 60 | | | | | | |

TABLEAU A.4.13: Résultats des mesures des pertes de charge Série XV :

| Série XV : $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.82$ $Hst = 60 \text{ mm}$ $T = 288 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| L = 4.37 Kg/m ² .s | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | |
| N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP | N° | G | ΔP |
| | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] | | [Kg/m ² .s] | [mm.CE] |
| 1 | 1.395 | 8 | 1 | 0.763 | 8 | 1 | 0.696 | 16 | 1 | 0.763 | 32 | 1 | 0.439 | 40 |
| 2 | 1.560 | 15 | 2 | 1.059 | 10 | 2 | 0.696 | 17 | 2 | 0.763 | 36 | 2 | 0.439 | 44 |
| 3 | 1.560 | 16 | 3 | 1.395 | 24 | 3 | 0.929 | 30 | 3 | 0.881 | 44 | 3 | 0.624 | 30 |
| 4 | 1.628 | 18 | 4 | 1.463 | 21 | 4 | 0.929 | 31 | 4 | 1.102 | 50 | 4 | 0.681 | 58 |
| 5 | 1.746 | 18 | 5 | 1.463 | 19 | 5 | 1.018 | 32 | 5 | 1.102 | 52 | 5 | 0.681 | 62 |
| 6 | 1.746 | 20 | 6 | 1.765 | 32 | 6 | 1.018 | 30 | 6 | 1.591 | 52 | 6 | 0.696 | 40 |
| 7 | 2.039 | 26 | 7 | 1.765 | 34 | 7 | 1.162 | 36 | 7 | 1.591 | 50 | 7 | 0.713 | 60 |
| 8 | 2.039 | 24 | 8 | 2.327 | 42 | 8 | 1.162 | 37 | 8 | 1.926 | 50 | 8 | 0.713 | 62 |
| 9 | 2.804 | 34 | 9 | 2.327 | 40 | 9 | 1.191 | 37 | 9 | 2.039 | 54 | 9 | 0.713 | 44 |
| 10 | 2.804 | 36 | 10 | 2.433 | 42 | 10 | 1.191 | 36 | 10 | 2.039 | 50 | 10 | 0.952 | 60 |
| 11 | 2.929 | 34 | 11 | 2.433 | 44 | 11 | 1.360 | 44 | 11 | 2.327 | 54 | 11 | 0.952 | 52 |
| 12 | 2.995 | 34 | 12 | 3.059 | 44 | 12 | 1.360 | 46 | 12 | 2.327 | 56 | 12 | 0.952 | 58 |
| 13 | 2.995 | 36 | 13 | 3.059 | 42 | 13 | 1.395 | 44 | 13 | 2.390 | 60 | 13 | 0.952 | 50 |
| 14 | 3.135 | 36 | 14 | 3.173 | 42 | 14 | 1.395 | 42 | 14 | 2.390 | 50 | 14 | 1.115 | 56 |
| 15 | 3.135 | 34 | 15 | 3.173 | 46 | 15 | 1.528 | 40 | 15 | 2.995 | 50 | 15 | 1.115 | 58 |
| 16 | 3.904 | 34 | 16 | 3.643 | 44 | 16 | 1.528 | 42 | 16 | 2.995 | 54 | 16 | 1.463 | 62 |
| 17 | 3.904 | 37 | 17 | 3.643 | 40 | 17 | 1.587 | 46 | 17 | 3.245 | 54 | 17 | 1.560 | 58 |
| 18 | 4.164 | 36 | 18 | 3.906 | 44 | 18 | 2.094 | 50 | 18 | 3.304 | 50 | 18 | 1.560 | 62 |
| 19 | 4.164 | 32 | 19 | 3.906 | 46 | 19 | 2.094 | 48 | 19 | 3.304 | 52 | 19 | 1.628 | 64 |
| 20 | 4.591 | 34 | 20 | 4.591 | 40 | 20 | 2.122 | 48 | 20 | 3.533 | 52 | 20 | 1.628 | 60 |
| 21 | 4.591 | 38 | 21 | 4.591 | 44 | 21 | 2.122 | 50 | 21 | 3.904 | 52 | 21 | 1.952 | 58 |
| 22 | 5.841 | 36 | 22 | 4.657 | 46 | 22 | 2.653 | 50 | 22 | 4.080 | 52 | 22 | 1.952 | 62 |
| 23 | 6.122 | 37 | 23 | 4.657 | 42 | 23 | 2.653 | 48 | 23 | 4.080 | 50 | 23 | 1.996 | 58 |
| 24 | 6.122 | 40 | 24 | 4.657 | 40 | 24 | 2.871 | 48 | 24 | 4.562 | 50 | 24 | 2.327 | 60 |
| 25 | 6.903 | 40 | 25 | 4.657 | 44 | 25 | 2.929 | 48 | 25 | 5.123 | 50 | 25 | 2.327 | 64 |
| | | | 26 | 5.447 | 44 | 26 | 3.059 | 46 | 26 | 5.123 | 52 | 26 | 2.428 | 60 |
| | | | 27 | 5.447 | 40 | 27 | 3.059 | 48 | 27 | 5.132 | 56 | 27 | 2.428 | 58 |
| | | | 28 | 6.054 | 36 | 28 | 3.418 | 50 | 28 | 5.132 | 48 | 28 | 2.862 | 58 |
| | | | 29 | 6.054 | 40 | 29 | 3.418 | 46 | 29 | 5.447 | 48 | 29 | 2.862 | 62 |
| | | | | | | 30 | 3.744 | 46 | 30 | 5.447 | 52 | 30 | 2.949 | 58 |
| | | | | | | 31 | 3.744 | 48 | 31 | 5.861 | 54 | 31 | 2.949 | 56 |
| | | | | | | 32 | 4.080 | 48 | 32 | 5.861 | 48 | 32 | 3.092 | 58 |
| | | | | | | 33 | 4.080 | 46 | 33 | 6.681 | 50 | 33 | 3.906 | 58 |
| | | | | | | 34 | 4.191 | 46 | 34 | 7.452 | 58 | 34 | 3.906 | 56 |
| | | | | | | 35 | 4.191 | 48 | 35 | 7.452 | 60 | 35 | 6.054 | 58 |
| | | | | | | 36 | 4.994 | 46 | 36 | 7.816 | 52 | 36 | 6.054 | 56 |
| | | | | | | 37 | 5.101 | 46 | 37 | 8.837 | 62 | 37 | 8.497 | 78 |
| | | | | | | 38 | 6.122 | 46 | 38 | 8.837 | 58 | 38 | 8.497 | 80 |

TABLEAU A.4.14: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série I

| Série I : $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.32$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst |
| | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] |
| 1 | 1,999 | 100 | 1,111 | 1 | 1,397 | 95 | 1,056 | 1 | 0,832 | 95 | 1,056 | 1 | 0,536 | 95 | 1,056 | 1 | 0,464 | 95 | 1,056 |
| 2 | 1,999 | 95 | 1,056 | 2 | 1,499 | 100 | 1,111 | 2 | 0,883 | 95 | 1,056 | 2 | 0,697 | 105 | 1,167 | 2 | 0,464 | 100 | 1,111 |
| 3 | 2,084 | 100 | 1,111 | 3 | 1,531 | 100 | 1,111 | 3 | 0,976 | 100 | 1,111 | 3 | 0,697 | 100 | 1,111 | 3 | 0,662 | 125 | 1,389 |
| 4 | 2,149 | 100 | 1,111 | 4 | 1,749 | 110 | 1,222 | 4 | 0,976 | 95 | 1,056 | 4 | 0,931 | 125 | 1,389 | 4 | 0,697 | 130 | 1,444 |
| 5 | 2,149 | 105 | 1,167 | 5 | 1,749 | 115 | 1,278 | 5 | 1,193 | 120 | 1,333 | 5 | 0,976 | 120 | 1,333 | 5 | 0,931 | 150 | 1,667 |
| 6 | 2,166 | 105 | 1,167 | 6 | 1,910 | 120 | 1,333 | 6 | 1,221 | 120 | 1,333 | 6 | 0,976 | 125 | 1,389 | 6 | 0,954 | 155 | 1,722 |
| 7 | 2,392 | 105 | 1,170 | 7 | 2,042 | 120 | 1,333 | 7 | 1,362 | 120 | 1,333 | 7 | 1,221 | 135 | 1,500 | 7 | 0,976 | 150 | 1,667 |
| 8 | 2,392 | 110 | 1,220 | 8 | 2,042 | 120 | 1,333 | 8 | 1,531 | 125 | 1,389 | 8 | 1,326 | 135 | 1,500 | 8 | 1,631 | 180 | 2,000 |
| 9 | 2,934 | 115 | 1,278 | 9 | 2,331 | 120 | 1,333 | 9 | 1,531 | 120 | 1,333 | 9 | 1,326 | 140 | 1,556 | 9 | 1,631 | 175 | 1,944 |
| 10 | 2,934 | 110 | 1,222 | 10 | 2,331 | 125 | 1,389 | 10 | 1,631 | 130 | 1,444 | 10 | 1,326 | 145 | 1,611 | 10 | 1,864 | 180 | 2,000 |
| 11 | 3,000 | 115 | 1,278 | 11 | 2,331 | 120 | 1,333 | 11 | 1,910 | 145 | 1,611 | 11 | 1,432 | 140 | 1,556 | 11 | 1,864 | 190 | 2,111 |
| 12 | 3,000 | 110 | 1,222 | 12 | 2,331 | 120 | 1,333 | 12 | 2,098 | 145 | 1,611 | 12 | 1,631 | 150 | 1,667 | 12 | 1,997 | 180 | 2,000 |
| 13 | 3,576 | 120 | 1,333 | 13 | 2,934 | 125 | 1,389 | 13 | 2,098 | 150 | 1,667 | 13 | 1,710 | 150 | 1,667 | 13 | 2,149 | 200 | 2,222 |
| 14 | 3,751 | 125 | 1,389 | 14 | 2,934 | 125 | 1,389 | 14 | 2,211 | 150 | 1,667 | 14 | 1,786 | 150 | 1,667 | 14 | 2,206 | 200 | 2,222 |
| 15 | 3,751 | 120 | 1,333 | 15 | 3,179 | 140 | 1,556 | 15 | 2,272 | 140 | 1,556 | 15 | 1,999 | 155 | 1,722 | 15 | 2,331 | 200 | 2,222 |
| 16 | 3,832 | 125 | 1,389 | 16 | 3,501 | 140 | 1,556 | 16 | 2,272 | 145 | 1,611 | 16 | 2,249 | 155 | 1,722 | 16 | 2,388 | 210 | 2,333 |
| 17 | 4,302 | 130 | 1,444 | 17 | 3,863 | 145 | 1,611 | 17 | 2,564 | 150 | 1,667 | 17 | 2,298 | 160 | 1,778 | 17 | 2,445 | 210 | 2,333 |
| 18 | 4,302 | 120 | 1,333 | 18 | 3,863 | 145 | 1,611 | 18 | 2,867 | 160 | 1,778 | 18 | 2,345 | 160 | 1,778 | 18 | 3,065 | 230 | 2,556 |
| 19 | 4,432 | 130 | 1,444 | 19 | 4,431 | 150 | 1,667 | 19 | 3,264 | 165 | 1,833 | 19 | 2,345 | 165 | 1,833 | 19 | 3,722 | 240 | 2,667 |
| 20 | 5,002 | 135 | 1,500 | 20 | 4,431 | 150 | 1,667 | 20 | 3,264 | 160 | 1,778 | 20 | 2,798 | 175 | 1,944 | 20 | 4,087 | 260 | 2,889 |
| 21 | 5,002 | 140 | 1,556 | 21 | 4,599 | 150 | 1,667 | 21 | 3,501 | 160 | 1,778 | 21 | 2,798 | 170 | 1,889 | 21 | 4,087 | 250 | 2,778 |
| 22 | 5,131 | 135 | 1,500 | 22 | 4,665 | 155 | 1,722 | 22 | 3,501 | 170 | 1,889 | 22 | 3,128 | 180 | 2,000 | 22 | 4,547 | 270 | 3,000 |
| 23 | 5,131 | 130 | 1,444 | 23 | 5,382 | 155 | 1,722 | 23 | 3,913 | 170 | 1,889 | 23 | 3,128 | 185 | 2,056 | 23 | 4,547 | 280 | 3,111 |
| 24 | 6,065 | 150 | 1,667 | 24 | 5,382 | 155 | 1,722 | 24 | 3,913 | 165 | 1,833 | 24 | 3,179 | 185 | 2,056 | 24 | 4,892 | 280 | 3,111 |
| 25 | 6,132 | 160 | 1,778 | 25 | 5,598 | 170 | 1,889 | 25 | 4,087 | 180 | 2,000 | 25 | 3,179 | 180 | 2,000 | 25 | 4,967 | 275 | 3,056 |
| 26 | 6,132 | 150 | 1,667 | 26 | 5,598 | 165 | 1,833 | 26 | 4,087 | 190 | 2,111 | 26 | 3,501 | 190 | 2,111 | 26 | 5,311 | 300 | 3,333 |
| 27 | 6,998 | 165 | 1,833 | 27 | 6,532 | 190 | 2,111 | 27 | 4,198 | 185 | 2,056 | 27 | 3,501 | 200 | 2,222 | 27 | 5,382 | 290 | 3,222 |
| 28 | 8,178 | 200 | 2,222 | 28 | 6,532 | 190 | 2,111 | 28 | 4,198 | 180 | 2,000 | 28 | 3,669 | 210 | 2,333 | 28 | 5,911 | 320 | 3,556 |
| 29 | 9,200 | 240 | 2,667 | 29 | 7,830 | 240 | 2,667 | 29 | 4,302 | 175 | 1,944 | 29 | 4,431 | 220 | 2,444 | 29 | 5,911 | 310 | 3,444 |
| | | | | 30 | 7,830 | 240 | 2,667 | 30 | 4,302 | 180 | 2,000 | 30 | 4,541 | 230 | 2,556 | 30 | 6,065 | 330 | 3,667 |
| | | | | 31 | 8,399 | 280 | 3,000 | 31 | 4,665 | 190 | 2,111 | 31 | 4,693 | 240 | 2,667 | 31 | 6,065 | 340 | 3,778 |
| | | | | 32 | 8,399 | 280 | 3,000 | 32 | 4,892 | 190 | 2,111 | 32 | 5,131 | 250 | 2,778 | 32 | 6,532 | 350 | 3,889 |
| | | | | | | | | 33 | 4,892 | 200 | 2,222 | 33 | 5,911 | 280 | 3,111 | 33 | 6,532 | 340 | 3,778 |
| | | | | | | | | 34 | 5,311 | 220 | 2,444 | 34 | 5,911 | 270 | 3,000 | 34 | 7,465 | 410 | 4,556 |
| | | | | | | | | 35 | 5,382 | 210 | 2,333 | 35 | 6,532 | 290 | 3,222 | | | | |
| | | | | | | | | 36 | 7,171 | 270 | 3,000 | 36 | 6,532 | 300 | 3,333 | | | | |
| | | | | | | | | 37 | 7,340 | 280 | 3,111 | 37 | 7,830 | 400 | 4,444 | | | | |
| | | | | | | | | 38 | 8,178 | 300 | 3,333 | | | | | | | | |

ANNEXES

TABEAU A.4.15: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série II

| Serie II : $\rho_p = 868 \text{ kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 1,999 | 100 | 1,111 | 1 | 1,397 | 95 | 1,056 | 1 | 0,832 | 95 | 1,056 | 1 | 0,536 | 95 | 1,056 | 1 | 0,464 | 95 | 1,056 |
| 2 | 1,999 | 95 | 1,056 | 2 | 1,499 | 100 | 1,111 | 2 | 0,883 | 95 | 1,056 | 2 | 0,697 | 105 | 1,167 | 2 | 0,464 | 100 | 1,111 |
| 3 | 2,084 | 100 | 1,111 | 3 | 1,531 | 100 | 1,111 | 3 | 0,976 | 100 | 1,111 | 3 | 0,697 | 100 | 1,111 | 3 | 0,662 | 125 | 1,389 |
| 4 | 2,149 | 100 | 1,111 | 4 | 1,749 | 110 | 1,222 | 4 | 1,193 | 120 | 1,333 | 4 | 0,931 | 125 | 1,389 | 4 | 0,697 | 130 | 1,444 |
| 5 | 2,149 | 105 | 1,167 | 5 | 1,749 | 115 | 1,278 | 5 | 1,221 | 120 | 1,333 | 5 | 0,976 | 125 | 1,389 | 5 | 0,931 | 150 | 1,667 |
| 6 | 2,166 | 105 | 1,167 | 6 | 1,910 | 120 | 1,333 | 6 | 1,362 | 120 | 1,333 | 6 | 1,135 | 135 | 1,500 | 6 | 0,954 | 155 | 1,722 |
| 7 | 2,392 | 105 | 1,170 | 7 | 2,042 | 120 | 1,333 | 7 | 1,531 | 125 | 1,389 | 7 | 1,326 | 135 | 1,500 | 7 | 0,976 | 150 | 1,667 |
| 8 | 2,392 | 110 | 1,220 | 8 | 2,331 | 120 | 1,333 | 8 | 1,531 | 120 | 1,333 | 8 | 1,326 | 140 | 1,556 | 8 | 1,631 | 180 | 2,000 |
| 9 | 2,934 | 115 | 1,278 | 9 | 2,331 | 125 | 1,389 | 9 | 1,631 | 130 | 1,444 | 9 | 1,326 | 145 | 1,611 | 9 | 1,631 | 175 | 1,944 |
| 10 | 2,934 | 110 | 1,222 | 10 | 2,934 | 125 | 1,389 | 10 | 1,910 | 145 | 1,611 | 10 | 1,432 | 140 | 1,556 | 10 | 1,864 | 180 | 2,000 |
| 11 | 3,000 | 115 | 1,278 | 11 | 3,179 | 140 | 1,556 | 11 | 2,098 | 145 | 1,611 | 11 | 1,631 | 150 | 1,667 | 11 | 1,864 | 190 | 2,111 |
| 12 | 3,000 | 110 | 1,222 | 12 | 3,501 | 140 | 1,556 | 12 | 2,098 | 150 | 1,667 | 12 | 1,710 | 150 | 1,667 | 12 | 1,997 | 190 | 2,111 |
| 13 | 3,576 | 120 | 1,333 | 13 | 3,863 | 145 | 1,611 | 13 | 2,211 | 150 | 1,667 | 13 | 1,786 | 150 | 1,667 | 13 | 1,997 | 180 | 2,000 |
| 14 | 3,751 | 125 | 1,389 | 14 | 4,431 | 150 | 1,667 | 14 | 2,272 | 145 | 1,611 | 14 | 1,999 | 155 | 1,722 | 14 | 2,149 | 200 | 2,222 |
| 15 | 3,751 | 120 | 1,333 | 15 | 4,599 | 150 | 1,667 | 15 | 2,564 | 150 | 1,667 | 15 | 2,249 | 155 | 1,722 | 15 | 2,206 | 200 | 2,222 |
| 16 | 3,832 | 120 | 1,333 | 16 | 4,665 | 155 | 1,722 | 16 | 2,867 | 160 | 1,778 | 16 | 2,249 | 160 | 1,778 | 16 | 2,331 | 200 | 2,222 |
| 17 | 3,832 | 125 | 1,389 | 17 | 5,382 | 155 | 1,722 | 17 | 2,867 | 160 | 1,778 | 17 | 2,298 | 160 | 1,778 | 17 | 2,388 | 210 | 2,333 |
| 18 | 4,302 | 130 | 1,444 | 18 | 5,598 | 170 | 1,889 | 18 | 3,264 | 165 | 1,833 | 18 | 2,345 | 160 | 1,778 | 18 | 2,445 | 210 | 2,333 |
| 19 | 4,302 | 120 | 1,333 | 19 | 5,598 | 165 | 1,833 | 19 | 3,264 | 160 | 1,778 | 19 | 2,345 | 165 | 1,833 | 19 | 3,065 | 230 | 2,556 |
| 20 | 4,432 | 130 | 1,444 | 20 | 6,532 | 190 | 2,111 | 20 | 3,501 | 160 | 1,778 | 20 | 2,798 | 175 | 1,944 | 20 | 3,722 | 240 | 2,667 |
| 21 | 5,002 | 135 | 1,500 | 21 | 7,830 | 240 | 2,667 | 21 | 3,501 | 170 | 1,889 | 21 | 3,128 | 180 | 2,000 | 21 | 4,087 | 260 | 2,889 |
| 22 | 5,002 | 140 | 1,556 | 22 | 8,399 | 280 | 3,000 | 22 | 3,913 | 170 | 1,889 | 22 | 3,128 | 185 | 2,056 | 22 | 4,087 | 250 | 2,778 |
| 23 | 5,131 | 135 | 1,500 | | | | | 23 | 3,913 | 165 | 1,833 | 23 | 3,501 | 190 | 2,111 | 23 | 4,547 | 270 | 3,000 |
| 24 | 5,131 | 130 | 1,444 | | | | | 24 | 4,087 | 180 | 2,000 | 24 | 3,501 | 200 | 2,222 | 24 | 4,547 | 280 | 3,111 |
| 25 | 6,065 | 150 | 1,667 | | | | | 25 | 4,087 | 190 | 2,111 | 25 | 3,669 | 210 | 2,333 | 25 | 4,892 | 280 | 3,111 |
| 26 | 6,132 | 160 | 1,778 | | | | | 26 | 4,198 | 185 | 2,056 | 26 | 3,913 | 220 | 2,444 | 26 | 4,967 | 275 | 3,056 |
| 27 | 6,132 | 150 | 1,667 | | | | | 27 | 4,198 | 180 | 2,000 | 27 | 4,431 | 220 | 2,444 | 27 | 5,311 | 300 | 3,333 |
| 28 | 6,998 | 165 | 1,833 | | | | | 28 | 4,302 | 175 | 1,944 | 28 | 4,541 | 230 | 2,556 | 28 | 5,382 | 290 | 3,222 |
| 29 | 6,998 | 165 | 1,833 | | | | | 29 | 4,302 | 180 | 2,000 | 29 | 4,541 | 240 | 2,667 | 29 | 5,911 | 320 | 3,556 |
| 30 | 8,178 | 200 | 2,222 | | | | | 30 | 4,665 | 190 | 2,111 | 30 | 4,665 | 245 | 2,722 | 30 | 5,911 | 310 | 3,444 |
| 31 | 8,178 | 200 | 2,222 | | | | | 31 | 4,892 | 190 | 2,111 | 31 | 4,665 | 240 | 2,667 | 31 | 6,065 | 330 | 3,667 |
| 32 | 9,200 | 240 | 2,667 | | | | | 32 | 4,892 | 190 | 2,111 | 32 | 4,693 | 230 | 2,556 | 32 | 6,065 | 340 | 3,778 |
| | | | | | | | | 33 | 4,892 | 200 | 2,222 | 33 | 4,693 | 240 | 2,667 | 33 | 6,532 | 350 | 3,889 |
| | | | | | | | | 34 | 5,311 | 220 | 2,444 | 34 | 5,131 | 250 | 2,778 | 34 | 6,532 | 340 | 3,778 |
| | | | | | | | | 35 | 5,382 | 210 | 2,333 | 35 | 5,911 | 280 | 3,111 | 35 | 7,465 | 410 | 4,556 |
| | | | | | | | | 36 | 7,171 | 270 | 3,000 | 36 | 5,911 | 270 | 3,000 | | | | |
| | | | | | | | | 37 | 7,340 | 280 | 3,111 | 37 | 6,532 | 290 | 3,222 | | | | |
| | | | | | | | | 38 | 8,178 | 300 | 3,333 | 38 | 6,532 | 300 | 3,333 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 39 | 7,830 | 400 | 4,444 | | | | |

TABEAU A.4.16: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série III

| Serie III : $\rho_p = 868 \text{ kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 2,412 | 100 | 1,111 | 1 | 1,688 | 100 | 1,111 | 1 | 1,315 | 100 | 1,111 | 1 | 1,245 | 115 | 1,278 |
| 2 | 2,587 | 100 | 1,111 | 2 | 2,095 | 110 | 1,222 | 2 | 1,330 | 95 | 1,056 | 2 | 1,383 | 115 | 1,278 |
| 3 | 2,679 | 100 | 1,111 | 3 | 2,292 | 120 | 1,333 | 3 | 1,357 | 95 | 1,056 | 3 | 1,409 | 120 | 1,333 |
| 4 | 2,685 | 105 | 1,167 | 4 | 2,396 | 120 | 1,333 | 4 | 1,375 | 100 | 1,111 | 4 | 1,555 | 130 | 1,444 |
| 5 | 2,685 | 110 | 1,222 | 5 | 2,534 | 120 | 1,333 | 5 | 1,392 | 100 | 1,111 | 5 | 1,846 | 140 | 1,556 |
| 6 | 2,937 | 110 | 1,222 | 6 | 2,942 | 140 | 1,556 | 6 | 1,775 | 120 | 1,333 | 6 | 1,846 | 140 | 1,556 |
| 7 | 2,952 | 110 | 1,222 | 7 | 3,210 | 130 | 1,444 | 7 | 2,476 | 140 | 1,556 | 7 | 1,915 | 140 | 1,556 |
| 8 | 2,952 | 115 | 1,278 | 8 | 3,481 | 140 | 1,556 | 8 | 2,476 | 135 | 1,500 | 8 | 2,665 | 150 | 1,667 |
| 9 | 3,164 | 110 | 1,222 | 9 | 3,481 | 145 | 1,611 | 9 | 2,497 | 130 | 1,444 | 9 | 2,665 | 160 | 1,778 |
| 10 | 3,285 | 110 | 1,222 | 10 | 3,533 | 135 | 1,500 | 10 | 2,497 | 140 | 1,556 | 10 | 2,760 | 150 | 1,667 |
| 11 | 3,285 | 120 | 1,333 | 11 | 4,030 | 150 | 1,667 | 11 | 2,572 | 140 | 1,556 | 11 | 3,223 | 160 | 1,778 |
| 12 | 3,673 | 115 | 1,278 | 12 | 4,047 | 150 | 1,667 | 12 | 3,029 | 145 | 1,611 | 12 | 3,223 | 170 | 1,889 |
| 13 | 3,943 | 120 | 1,333 | 13 | 4,047 | 160 | 1,778 | 13 | 3,223 | 150 | 1,667 | 13 | 3,675 | 170 | 1,889 |
| 14 | 4,319 | 130 | 1,444 | 14 | 4,460 | 150 | 1,667 | 14 | 3,329 | 150 | 1,667 | 14 | 3,675 | 160 | 1,778 |
| 15 | 4,848 | 130 | 1,444 | 15 | 4,460 | 160 | 1,778 | 15 | 3,999 | 160 | 1,778 | 15 | 3,950 | 170 | 1,889 |
| 16 | 4,848 | 140 | 1,556 | 16 | 4,927 | 170 | 1,889 | 16 | 4,415 | 170 | 1,889 | 16 | 3,950 | 180 | 2,000 |
| 17 | 5,192 | 140 | 1,556 | 17 | 4,927 | 160 | 1,778 | 17 | 4,756 | 170 | 1,889 | 17 | 4,142 | 170 | 1,889 |
| 18 | 5,216 | 140 | 1,556 | 18 | 5,132 | 160 | 1,778 | 18 | 4,856 | 170 | 1,889 | 18 | 4,917 | 180 | 2,000 |
| 19 | 5,300 | 140 | 1,556 | 19 | 5,268 | 170 | 1,889 | 19 | 5,703 | 190 | 2,111 | 19 | 5,586 | 210 | 2,333 |
| 20 | 5,879 | 140 | 1,556 | 20 | 5,588 | 160 | 1,778 | 20 | 5,861 | 190 | 2,111 | 20 | 5,586 | 200 | 2,222 |
| 21 | 5,879 | 150 | 1,667 | 21 | 5,703 | 160 | 1,778 | 21 | 6,122 | 200 | 2,222 | 21 | 5,703 | 220 | 2,444 |
| 22 | 6,833 | 160 | 1,778 | 22 | 5,797 | 170 | 1,889 | 22 | 6,520 | 210 | 2,333 | 22 | 5,703 | 210 | 2,333 |
| 23 | 6,833 | 150 | 1,667 | 23 | 6,419 | 180 | 2,000 | 23 | 6,520 | 220 | 2,444 | 23 | 5,726 | 220 | 2,444 |
| | | | | 24 | 7,903 | 190 | 2,111 | 24 | 6,986 | 220 | 2,444 | 24 | 5,889 | 220 | 2,444 |
| | | | | 25 | 7,903 | 200 | 2,222 | 25 | 9,127 | 310 | 3,444 | 25 | 5,948 | 210 | 2,333 |
| | | | | 26 | 8,497 | 220 | 2,444 | 26 | 10,268 | 340 | 3,778 | 26 | 6,334 | 230 | 2,556 |
| | | | | | | | | 27 | 11,410 | 390 | 4,333 | 27 | 6,766 | 240 | 2,667 |
| | | | | | | | | | | | | 28 | 7,434 | 300 | 3,333 |
| | | | | | | | | | | | | 29 | 8,098 | 330 | 3,667 |
| | | | | | | | | | | | | 30 | 8,497 | 390 | 4,333 |
| | | | | | | | | | | | | 31 | 9,221 | 440 | 4,889 |

TABLEAU A.4.17: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série IV

| Serie IV : $\rho_p = 868 \text{ kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\phi = 0.82$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst |
| | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] |
| 1 | 2,335 | 65 | 1,083 | 1 | 1,498 | 70 | 1,167 | 1 | 0,955 | 70 | 1,167 | 1 | 0,487 | 65 | 1,083 | 1 | 0,697 | 90 | 1,500 |
| 2 | 2,504 | 70 | 1,167 | 2 | 1,498 | 65 | 1,083 | 2 | 1,021 | 70 | 1,167 | 2 | 0,668 | 75 | 1,250 | 2 | 0,748 | 95 | 1,583 |
| 3 | 2,803 | 75 | 1,250 | 3 | 1,634 | 70 | 1,167 | 3 | 1,083 | 70 | 1,167 | 3 | 1,166 | 110 | 1,833 | 3 | 0,764 | 95 | 1,583 |
| 4 | 2,814 | 75 | 1,250 | 4 | 1,634 | 75 | 1,250 | 4 | 1,166 | 80 | 1,333 | 4 | 1,166 | 120 | 2,000 | 4 | 0,931 | 115 | 1,917 |
| 5 | 3,270 | 80 | 1,333 | 5 | 1,914 | 90 | 1,500 | 5 | 1,166 | 90 | 1,500 | 5 | 1,400 | 140 | 2,333 | 5 | 0,931 | 110 | 1,833 |
| 6 | 3,582 | 80 | 1,333 | 6 | 1,914 | 95 | 1,583 | 6 | 1,166 | 75 | 1,250 | 6 | 1,533 | 145 | 2,417 | 6 | 0,931 | 120 | 2,000 |
| 7 | 3,582 | 85 | 1,417 | 7 | 2,101 | 100 | 1,667 | 7 | 1,166 | 85 | 1,417 | 7 | 1,533 | 140 | 2,333 | 7 | 0,931 | 125 | 2,083 |
| 8 | 3,738 | 90 | 1,500 | 8 | 2,101 | 105 | 1,750 | 8 | 1,400 | 95 | 1,583 | 8 | 1,656 | 150 | 2,500 | 8 | 1,081 | 115 | 1,917 |
| 9 | 4,094 | 90 | 1,500 | 9 | 2,814 | 115 | 1,917 | 9 | 1,400 | 90 | 1,500 | 9 | 1,713 | 160 | 2,667 | 9 | 1,164 | 140 | 2,333 |
| 10 | 4,094 | 95 | 1,583 | 10 | 2,939 | 125 | 2,083 | 10 | 1,400 | 100 | 1,667 | 10 | 1,713 | 155 | 2,583 | 10 | 1,164 | 150 | 2,500 |
| 11 | 4,607 | 100 | 1,667 | 11 | 2,939 | 120 | 2,000 | 11 | 1,501 | 100 | 1,667 | 11 | 1,867 | 165 | 2,750 | 11 | 1,164 | 155 | 2,583 |
| 12 | 5,391 | 115 | 1,917 | 12 | 3,070 | 125 | 2,083 | 12 | 1,501 | 105 | 1,750 | 12 | 1,914 | 165 | 2,750 | 12 | 1,327 | 165 | 2,750 |
| 13 | 5,608 | 115 | 1,917 | 13 | 3,675 | 135 | 2,250 | 13 | 2,046 | 120 | 2,000 | 13 | 2,003 | 170 | 2,833 | 13 | 1,327 | 170 | 2,833 |
| 14 | 5,842 | 120 | 2,000 | 14 | 3,758 | 135 | 2,250 | 14 | 2,046 | 125 | 2,083 | 14 | 2,153 | 170 | 2,833 | 14 | 1,352 | 180 | 3,000 |
| 15 | 6,543 | 130 | 2,167 | 15 | 4,673 | 145 | 2,417 | 15 | 2,558 | 130 | 2,167 | 15 | 2,153 | 180 | 3,000 | 15 | 1,352 | 170 | 2,833 |
| 16 | 6,543 | 140 | 2,333 | 16 | 4,788 | 150 | 2,500 | 16 | 2,558 | 125 | 2,083 | 16 | 2,335 | 175 | 2,917 | 16 | 1,397 | 170 | 2,833 |
| 17 | 7,478 | 170 | 2,833 | 17 | 5,028 | 145 | 2,417 | 17 | 2,569 | 130 | 2,167 | 17 | 2,449 | 190 | 3,167 | 17 | 1,397 | 175 | 2,917 |
| | | | | 18 | 5,140 | 150 | 2,500 | 18 | 2,803 | 135 | 2,250 | 18 | 2,803 | 200 | 3,333 | 18 | 1,397 | 190 | 3,167 |
| | | | | 19 | 6,076 | 170 | 2,833 | 19 | 2,803 | 130 | 2,167 | 19 | 2,872 | 200 | 3,333 | 19 | 1,397 | 180 | 3,000 |
| | | | | 20 | 6,543 | 190 | 3,167 | 20 | 2,812 | 130 | 2,167 | 20 | 3,582 | 210 | 3,500 | 20 | 1,671 | 200 | 3,333 |
| | | | | 21 | 6,543 | 180 | 3,000 | 21 | 2,872 | 135 | 2,250 | 21 | 3,675 | 210 | 3,500 | 21 | 1,671 | 205 | 3,417 |
| | | | | | | | | 22 | 3,270 | 135 | 2,250 | 22 | 3,675 | 215 | 3,583 | 22 | 1,710 | 215 | 3,583 |
| | | | | | | | | 23 | 3,462 | 140 | 2,333 | 23 | 3,830 | 220 | 3,667 | 23 | 1,710 | 210 | 3,500 |
| | | | | | | | | 24 | 3,738 | 150 | 2,500 | 24 | 4,008 | 225 | 3,750 | 24 | 1,999 | 220 | 3,667 |
| | | | | | | | | 25 | 3,738 | 140 | 2,333 | 25 | 4,008 | 230 | 3,833 | 25 | 1,999 | 225 | 3,750 |
| | | | | | | | | 26 | 3,920 | 160 | 2,667 | 26 | 4,607 | 250 | 4,167 | 26 | 2,249 | 235 | 3,917 |
| | | | | | | | | 27 | 3,920 | 150 | 2,500 | 27 | 4,673 | 240 | 4,000 | 27 | 2,249 | 230 | 3,833 |
| | | | | | | | | 28 | 4,205 | 160 | 2,667 | 28 | 5,140 | 280 | 4,667 | 28 | 2,331 | 235 | 3,917 |
| | | | | | | | | 29 | 4,205 | 165 | 2,750 | 29 | 5,140 | 285 | 4,750 | 29 | 2,331 | 240 | 4,000 |
| | | | | | | | | 30 | 4,901 | 190 | 3,167 | 30 | 5,608 | 320 | 5,333 | 30 | 2,388 | 260 | 4,333 |
| | | | | | | | | 31 | 4,901 | 180 | 3,000 | 31 | 5,608 | 310 | 5,167 | 31 | 2,388 | 250 | 4,167 |
| | | | | | | | | 32 | 5,146 | 200 | 3,333 | | | | | 32 | 2,500 | 260 | 4,333 |
| | | | | | | | | 33 | 5,608 | 210 | 3,500 | | | | | 33 | 2,500 | 265 | 4,417 |
| | | | | | | | | 34 | 5,608 | 220 | 3,667 | | | | | 34 | 3,731 | 300 | 5,000 |
| | | | | | | | | 35 | 5,882 | 220 | 3,667 | | | | | 35 | 3,913 | 310 | 5,167 |
| | | | | | | | | 36 | 6,543 | 300 | 5,000 | | | | | 36 | 4,665 | 390 | 6,500 |
| | | | | | | | | 37 | 6,543 | 290 | 4,833 | | | | | 37 | 5,019 | 400 | 6,667 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 38 | 5,598 | 440 | 7,333 |

TABLEAU A.4.18: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série V

| Série V: $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\varphi = 0.56$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst |
| | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] |
| 1 | 2,345 | 65 | 1,083 | 1 | 0,998 | 60 | 1,000 | 1 | 0,931 | 70 | 1,167 | 1 | 0,731 | 80 | 1,333 | 1 | 0,697 | 80 | 1,333 |
| 2 | 2,689 | 70 | 1,167 | 2 | 1,397 | 65 | 1,083 | 2 | 0,976 | 70 | 1,167 | 2 | 0,780 | 70 | 1,167 | 2 | 1,135 | 115 | 1,917 |
| 3 | 2,750 | 70 | 1,167 | 3 | 1,631 | 70 | 1,167 | 3 | 1,135 | 75 | 1,250 | 3 | 0,780 | 80 | 1,333 | 3 | 1,135 | 110 | 1,833 |
| 4 | 2,758 | 70 | 1,167 | 4 | 1,710 | 70 | 1,167 | 4 | 1,466 | 80 | 1,333 | 4 | 0,780 | 75 | 1,250 | 4 | 1,397 | 125 | 2,083 |
| 5 | 2,934 | 70 | 1,167 | 5 | 1,769 | 75 | 1,250 | 5 | 1,466 | 85 | 1,417 | 5 | 0,868 | 80 | 1,333 | 5 | 1,397 | 120 | 2,000 |
| 6 | 3,650 | 70 | 1,167 | 6 | 1,864 | 75 | 1,250 | 6 | 1,593 | 80 | 1,333 | 6 | 0,868 | 75 | 1,250 | 6 | 1,710 | 140 | 2,333 |
| 7 | 3,913 | 75 | 1,250 | 7 | 1,999 | 80 | 1,333 | 7 | 1,593 | 75 | 1,250 | 7 | 0,907 | 85 | 1,417 | 7 | 1,710 | 130 | 2,167 |
| 8 | 3,913 | 75 | 1,250 | 8 | 1,999 | 75 | 1,250 | 8 | 1,955 | 90 | 1,500 | 8 | 0,931 | 90 | 1,500 | 8 | 2,331 | 140 | 2,333 |
| 9 | 4,001 | 75 | 1,250 | 9 | 2,445 | 80 | 1,333 | 9 | 1,955 | 100 | 1,667 | 9 | 0,931 | 85 | 1,417 | 9 | 2,331 | 150 | 2,500 |
| 10 | 4,087 | 75 | 1,250 | 10 | 2,658 | 80 | 1,333 | 10 | 2,042 | 90 | 1,500 | 10 | 1,248 | 100 | 1,667 | 10 | 2,553 | 145 | 2,417 |
| 11 | 4,665 | 80 | 1,333 | 11 | 2,727 | 80 | 1,333 | 11 | 2,331 | 110 | 1,833 | 11 | 1,466 | 100 | 1,667 | 11 | 2,654 | 140 | 2,333 |
| 12 | 4,665 | 85 | 1,417 | 12 | 2,727 | 85 | 1,417 | 12 | 2,727 | 95 | 1,583 | 12 | 1,466 | 105 | 1,750 | 12 | 2,654 | 150 | 2,500 |
| 13 | 4,780 | 85 | 1,417 | 13 | 3,000 | 90 | 1,500 | 13 | 2,798 | 100 | 1,667 | 13 | 2,042 | 115 | 1,917 | 13 | 3,179 | 160 | 2,667 |
| 14 | 4,780 | 80 | 1,333 | 14 | 3,000 | 85 | 1,417 | 14 | 2,934 | 100 | 1,667 | 14 | 2,042 | 110 | 1,833 | 14 | 3,540 | 165 | 2,750 |
| 15 | 5,456 | 90 | 1,500 | 15 | 3,424 | 90 | 1,500 | 15 | 2,934 | 105 | 1,750 | 15 | 2,125 | 110 | 1,833 | 15 | 3,540 | 160 | 2,667 |
| 16 | 5,456 | 95 | 1,583 | 16 | 3,731 | 90 | 1,500 | 16 | 3,264 | 105 | 1,750 | 16 | 2,125 | 115 | 1,917 | 16 | 3,793 | 185 | 3,083 |
| 17 | 6,132 | 90 | 1,500 | 17 | 3,731 | 95 | 1,583 | 17 | 3,264 | 100 | 1,667 | 17 | 2,206 | 115 | 1,917 | 17 | 3,793 | 180 | 3,000 |
| 18 | 6,132 | 95 | 1,583 | 18 | 4,092 | 95 | 1,583 | 18 | 3,731 | 105 | 1,750 | 18 | 2,206 | 110 | 1,833 | 18 | 4,001 | 165 | 2,750 |
| 19 | 6,196 | 100 | 1,667 | 19 | 4,092 | 90 | 1,500 | 19 | 3,731 | 120 | 2,000 | 19 | 2,553 | 125 | 2,083 | 19 | 4,001 | 170 | 2,833 |
| 20 | 8,319 | 130 | 2,167 | 20 | 4,302 | 100 | 1,667 | 20 | 3,731 | 100 | 1,667 | 20 | 2,606 | 120 | 2,000 | 20 | 4,198 | 185 | 3,083 |
| | | | | 21 | 4,425 | 105 | 1,750 | 21 | 3,731 | 110 | 1,833 | 21 | 2,689 | 125 | 2,083 | 21 | 4,198 | 180 | 3,000 |
| | | | | 22 | 4,425 | 100 | 1,667 | 22 | 3,913 | 115 | 1,917 | 22 | 2,934 | 125 | 2,083 | 22 | 4,254 | 180 | 3,000 |
| | | | | 23 | 4,868 | 100 | 1,667 | 23 | 3,913 | 120 | 2,000 | 23 | 3,190 | 130 | 2,167 | 23 | 4,665 | 200 | 3,333 |
| | | | | 24 | 4,868 | 105 | 1,750 | 24 | 4,302 | 135 | 2,250 | 24 | 3,424 | 130 | 2,167 | 24 | 4,892 | 200 | 3,333 |
| | | | | 25 | 5,001 | 105 | 1,750 | 25 | 4,302 | 130 | 2,167 | 25 | 3,913 | 140 | 2,333 | 25 | 4,892 | 210 | 3,500 |
| | | | | 26 | 5,001 | 100 | 1,667 | 26 | 4,403 | 125 | 2,083 | 26 | 4,001 | 140 | 2,333 | 26 | 5,002 | 200 | 3,333 |
| | | | | 27 | 5,754 | 125 | 2,083 | 27 | 4,403 | 130 | 2,167 | 27 | 4,403 | 145 | 2,417 | 27 | 5,002 | 190 | 3,167 |
| | | | | 28 | 6,065 | 125 | 2,083 | 28 | 4,665 | 130 | 2,167 | 28 | 4,431 | 150 | 2,500 | 28 | 5,382 | 220 | 3,667 |
| | | | | 29 | 6,065 | 130 | 2,167 | 29 | 4,665 | 135 | 2,250 | 29 | 5,258 | 185 | 3,083 | 29 | 5,382 | 230 | 3,833 |
| | | | | 30 | 6,132 | 130 | 2,167 | 30 | 4,665 | 140 | 2,333 | 30 | 5,258 | 180 | 3,000 | 30 | 5,503 | 220 | 3,667 |
| | | | | 31 | 7,830 | 180 | 3,000 | 31 | 4,780 | 120 | 2,000 | 31 | 6,132 | 200 | 3,333 | 31 | 5,503 | 210 | 3,500 |
| | | | | | | | | 32 | 5,131 | 135 | 2,250 | 32 | 6,132 | 210 | 3,500 | 32 | 5,754 | 240 | 4,000 |
| | | | | | | | | 33 | 5,131 | 140 | 2,333 | 33 | 6,532 | 210 | 3,500 | 33 | 6,132 | 260 | 4,333 |
| | | | | | | | | 34 | 5,736 | 130 | 2,167 | 34 | 8,319 | 290 | 4,833 | 34 | 6,693 | 280 | 4,667 |
| | | | | | | | | 35 | 5,871 | 150 | 2,500 | 35 | 8,319 | 280 | 4,667 | 35 | 6,693 | 270 | 4,500 |
| | | | | | | | | 36 | 5,871 | 160 | 2,667 | | | | | 36 | 7,155 | 290 | 4,833 |
| | | | | | | | | 37 | 6,065 | 150 | 2,500 | | | | | 37 | 8,178 | 440 | 7,333 |
| | | | | | | | | 38 | 7,465 | 220 | 3,667 | | | | | 38 | 8,178 | 430 | 7,167 |

TABLEAU A.4.19: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série VI

| Série VI: $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\varphi = 0.82$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|
| L = 10.23 Kg/m ³ .s | | | | L = 15.84 Kg/m ³ .s | | | | L = 20.94 Kg/m ³ .s | | | | L = 27.90 Kg/m ³ .s | | | |
| N° | G [Kg/m ³ .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ³ .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ³ .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ³ .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 2,500 | 65 | 1,083 | 1 | 1,248 | 65 | 1,083 | 1 | 0,697 | 65 | 1,083 | 1 | 0,697 | 90 | 1,500 |
| 2 | 3,913 | 80 | 1,333 | 2 | 1,432 | 70 | 1,167 | 2 | 0,976 | 75 | 1,250 | 2 | 0,697 | 85 | 1,417 |
| 3 | 5,110 | 85 | 1,417 | 3 | 1,466 | 70 | 1,167 | 3 | 1,164 | 80 | 1,333 | 3 | 0,780 | 85 | 1,417 |
| 4 | 5,110 | 80 | 1,333 | 4 | 1,955 | 75 | 1,250 | 4 | 1,164 | 75 | 1,250 | 4 | 0,931 | 90 | 1,500 |
| 5 | 6,298 | 100 | 1,667 | 5 | 1,955 | 80 | 1,333 | 5 | 1,377 | 80 | 1,333 | 5 | 0,931 | 95 | 1,583 |
| 6 | 6,298 | 105 | 1,750 | 6 | 2,388 | 80 | 1,333 | 6 | 1,377 | 85 | 1,417 | 6 | 1,221 | 100 | 1,667 |
| 7 | 7,155 | 120 | 2,000 | 7 | 2,445 | 85 | 1,417 | 7 | 1,631 | 90 | 1,500 | 7 | 1,221 | 95 | 1,583 |
| | | | | 8 | 3,128 | 90 | 1,500 | 8 | 1,631 | 85 | 1,417 | 8 | 1,531 | 100 | 1,667 |
| | | | | 9 | 3,424 | 90 | 1,500 | 9 | 2,331 | 100 | 1,667 | 9 | 1,671 | 110 | 1,833 |
| | | | | 10 | 3,424 | 100 | 1,667 | 10 | 2,331 | 95 | 1,583 | 10 | 1,864 | 105 | 1,750 |
| | | | | 11 | 3,731 | 100 | 1,667 | 11 | 2,392 | 95 | 1,583 | 11 | 1,910 | 115 | 1,917 |
| | | | | 12 | 4,898 | 110 | 1,833 | 12 | 2,445 | 100 | 1,667 | 12 | 1,910 | 110 | 1,833 |
| | | | | 13 | 5,598 | 115 | 1,917 | 13 | 2,798 | 100 | 1,667 | 13 | 2,125 | 115 | 1,917 |
| | | | | 14 | 5,598 | 110 | 1,833 | 14 | 2,798 | 110 | 1,833 | 14 | 2,867 | 115 | 1,917 |
| | | | | 15 | 8,319 | 160 | 2,667 | 15 | 2,798 | 105 | 1,750 | 15 | 3,128 | 120 | 2,000 |
| | | | | | | | | 16 | 3,264 | 110 | 1,833 | 16 | 3,731 | 125 | 2,083 |
| | | | | | | | | 17 | 3,424 | 110 | 1,833 | 17 | 3,731 | 125 | 2,083 |
| | | | | | | | | 18 | 3,424 | 115 | 1,917 | 18 | 3,731 | 130 | 2,167 |
| | | | | | | | | 19 | 3,731 | 120 | 2,000 | 19 | 4,087 | 130 | 2,167 |
| | | | | | | | | 20 | 4,665 | 120 | 2,000 | 20 | 4,198 | 130 | 2,167 |
| | | | | | | | | 21 | 4,665 | 115 | 1,917 | 21 | 4,198 | 135 | 2,250 |
| | | | | | | | | 22 | 5,598 | 120 | 2,000 | 22 | 4,648 | 140 | 2,333 |
| | | | | | | | | 23 | 5,832 | 130 | 2,167 | 23 | 4,665 | 135 | 2,250 |
| | | | | | | | | 24 | 5,832 | 130 | 2,167 | 24 | 4,892 | 135 | 2,250 |
| | | | | | | | | 25 | 6,532 | 150 | 2,500 | 25 | 5,131 | 150 | 2,500 |
| | | | | | | | | | | | | 26 | 5,131 | 145 | 2,417 |
| | | | | | | | | | | | | 27 | 5,598 | 165 | 2,750 |
| | | | | | | | | | | | | 28 | 5,598 | 160 | 2,667 |
| | | | | | | | | | | | | 29 | 5,598 | 165 | 2,750 |

TABLEAU A.4.20: Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série VII

| Série VII: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 10 \text{ mm}$ $\varphi = 0.32$ $H_{st} = 120 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.04 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 2,530 | 130 | 1,083 | 1 | 0,932 | 125 | 1,042 | 1 | 0,932 | 125 | 1,042 | 1 | 0,699 | 135 | 1,125 | 1 | 0,476 | 130 | 1,083 |
| 2 | 2,780 | 135 | 1,125 | 2 | 1,367 | 130 | 1,083 | 2 | 1,142 | 130 | 1,083 | 2 | 0,699 | 130 | 1,083 | 2 | 0,699 | 140 | 1,167 |
| 3 | 2,803 | 130 | 1,083 | 3 | 1,656 | 130 | 1,083 | 3 | 1,166 | 140 | 1,167 | 3 | 0,973 | 140 | 1,167 | 3 | 0,745 | 150 | 1,250 |
| 4 | 3,432 | 150 | 1,250 | 4 | 1,656 | 135 | 1,125 | 4 | 1,223 | 135 | 1,125 | 4 | 1,021 | 140 | 1,167 | 4 | 0,932 | 165 | 1,375 |
| 5 | 3,545 | 140 | 1,167 | 5 | 1,852 | 135 | 1,125 | 5 | 1,400 | 145 | 1,208 | 5 | 1,063 | 140 | 1,167 | 5 | 0,932 | 170 | 1,417 |
| 6 | 3,545 | 150 | 1,250 | 6 | 1,867 | 135 | 1,125 | 6 | 1,533 | 145 | 1,208 | 6 | 1,318 | 160 | 1,333 | 6 | 0,955 | 180 | 1,500 |
| 7 | 3,729 | 150 | 1,250 | 7 | 1,867 | 140 | 1,167 | 7 | 1,533 | 150 | 1,250 | 7 | 1,318 | 150 | 1,250 | 7 | 0,955 | 170 | 1,417 |
| 8 | 3,738 | 150 | 1,250 | 8 | 2,210 | 140 | 1,167 | 8 | 1,565 | 160 | 1,333 | 8 | 1,596 | 180 | 1,500 | 8 | 1,166 | 200 | 1,667 |
| 9 | 4,205 | 165 | 1,375 | 9 | 2,287 | 140 | 1,167 | 9 | 1,634 | 160 | 1,333 | 9 | 1,626 | 180 | 1,500 | 9 | 1,195 | 190 | 1,583 |
| 10 | 4,205 | 160 | 1,333 | 10 | 2,287 | 150 | 1,250 | 10 | 1,714 | 160 | 1,333 | 10 | 1,634 | 190 | 1,583 | 10 | 1,195 | 200 | 1,667 |
| 11 | 4,578 | 170 | 1,417 | 11 | 2,470 | 150 | 1,250 | 11 | 1,714 | 155 | 1,292 | 11 | 1,634 | 200 | 1,667 | 11 | 1,400 | 240 | 2,000 |
| 12 | 4,673 | 160 | 1,333 | 12 | 2,803 | 170 | 1,333 | 12 | 1,867 | 170 | 1,417 | 12 | 1,793 | 190 | 1,583 | 12 | 1,400 | 230 | 1,917 |
| 13 | 4,673 | 170 | 1,417 | 13 | 2,803 | 170 | 1,417 | 13 | 1,867 | 175 | 1,458 | 13 | 1,793 | 180 | 1,500 | 13 | 1,501 | 240 | 2,000 |
| 14 | 4,788 | 170 | 1,417 | 14 | 2,939 | 170 | 1,417 | 14 | 2,003 | 180 | 1,500 | 14 | 2,046 | 240 | 2,000 | 14 | 1,634 | 270 | 2,250 |
| 15 | 5,224 | 180 | 1,500 | 15 | 2,939 | 180 | 1,500 | 15 | 2,003 | 190 | 1,583 | 15 | 2,287 | 240 | 2,000 | 15 | 1,867 | 290 | 2,417 |
| 16 | 5,608 | 180 | 1,500 | 16 | 3,270 | 200 | 1,667 | 16 | 2,287 | 200 | 1,667 | 16 | 2,287 | 230 | 1,917 | 16 | 1,867 | 280 | 2,333 |
| 17 | 5,608 | 190 | 1,583 | 17 | 3,288 | 180 | 1,500 | 17 | 2,287 | 190 | 1,583 | 17 | 2,399 | 260 | 2,167 | 17 | 2,235 | 270 | 2,250 |
| 18 | 7,460 | 240 | 2,000 | 18 | 3,432 | 190 | 1,583 | 18 | 2,335 | 190 | 1,583 | 18 | 2,803 | 260 | 2,167 | 18 | 2,393 | 290 | 2,417 |
| 19 | 7,478 | 240 | 2,000 | 19 | 3,738 | 200 | 1,667 | 19 | 2,335 | 200 | 1,667 | 19 | 2,803 | 270 | 2,250 | 19 | 2,505 | 310 | 2,583 |
| 20 | 8,824 | 290 | 2,417 | 20 | 3,738 | 190 | 1,583 | 20 | 2,449 | 210 | 1,750 | 20 | 2,803 | 280 | 2,333 | 20 | 2,505 | 300 | 2,500 |
| | | | | 21 | 3,920 | 220 | 1,833 | 21 | 2,449 | 200 | 1,667 | 21 | 3,133 | 260 | 2,167 | 21 | 2,770 | 320 | 2,667 |
| | | | | 22 | 4,179 | 200 | 1,667 | 22 | 2,803 | 220 | 1,833 | 22 | 3,256 | 260 | 2,167 | 22 | 2,770 | 310 | 2,583 |
| | | | | 23 | 4,179 | 210 | 1,750 | 23 | 2,803 | 230 | 1,917 | 23 | 3,738 | 310 | 2,583 | 23 | 2,872 | 310 | 2,583 |
| | | | | 24 | 4,262 | 210 | 1,750 | 24 | 2,872 | 230 | 1,917 | 24 | 3,738 | 300 | 2,500 | 24 | 3,432 | 340 | 2,833 |
| | | | | 25 | 4,673 | 230 | 1,917 | 25 | 2,872 | 240 | 2,000 | 25 | 3,830 | 300 | 2,500 | 25 | 3,432 | 350 | 2,917 |
| | | | | 26 | 4,673 | 220 | 1,833 | 26 | 3,270 | 230 | 1,917 | 26 | 4,008 | 290 | 2,417 | 26 | 3,738 | 360 | 3,000 |
| | | | | 27 | 4,901 | 230 | 1,917 | 27 | 3,270 | 240 | 2,000 | 27 | 4,343 | 320 | 2,667 | 27 | 3,738 | 370 | 3,083 |
| | | | | 28 | 4,901 | 220 | 1,833 | 28 | 3,489 | 250 | 2,083 | 28 | 4,788 | 310 | 2,583 | 28 | 3,830 | 360 | 3,000 |
| | | | | 29 | 5,119 | 240 | 2,000 | 29 | 3,738 | 240 | 2,000 | 29 | 4,788 | 300 | 2,500 | 29 | 4,005 | 400 | 3,333 |
| | | | | 30 | 5,119 | 250 | 2,083 | 30 | 4,008 | 250 | 2,083 | 30 | 5,328 | 330 | 2,750 | 30 | 4,005 | 390 | 3,250 |
| | | | | 31 | 5,608 | 260 | 2,167 | 31 | 4,578 | 260 | 2,167 | 31 | 5,429 | 360 | 3,000 | 31 | 4,262 | 390 | 3,250 |
| | | | | 32 | 6,143 | 250 | 2,083 | 32 | 4,578 | 270 | 2,250 | 32 | 5,608 | 360 | 3,000 | 32 | 4,262 | 400 | 3,333 |
| | | | | 33 | 6,309 | 250 | 2,083 | 33 | 4,673 | 270 | 2,250 | 33 | 5,746 | 370 | 3,083 | 33 | 4,673 | 400 | 3,333 |
| | | | | 34 | 6,543 | 270 | 2,250 | 34 | 5,140 | 260 | 2,167 | 34 | 5,746 | 360 | 3,000 | 34 | 4,901 | 430 | 3,583 |
| | | | | 35 | 7,011 | 290 | 2,417 | 35 | 5,529 | 290 | 2,417 | | | | | 35 | 4,901 | 420 | 3,500 |
| | | | | 36 | 7,478 | 320 | 2,667 | 36 | 5,608 | 280 | 2,333 | | | | | 36 | 5,140 | 440 | 3,667 |
| | | | | 37 | | | | 37 | 5,608 | 290 | 2,417 | | | | | 37 | 5,328 | 440 | 3,667 |
| | | | | 38 | | | | 38 | 6,608 | 390 | 3,250 | | | | | 38 | 5,328 | 450 | 3,750 |

TABLEAU A.4.21. Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série VIII

| Série VIII: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\varphi = 0.56$ $H_{st} = 120 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 2,249 | 125 | 1,042 | 1 | 1,395 | 125 | 1,042 | 1 | 0,929 | 130 | 1,083 | 1 | 0,976 | 125 | 1,042 | 1 | 0,624 | 125 | 1,042 |
| 2 | 2,553 | 130 | 1,083 | 2 | 1,628 | 135 | 1,125 | 2 | 1,323 | 125 | 1,042 | 2 | 1,164 | 135 | 1,125 | 2 | 0,697 | 125 | 1,042 |
| 3 | 2,658 | 125 | 1,042 | 3 | 1,861 | 140 | 1,167 | 3 | 1,395 | 140 | 1,167 | 3 | 1,164 | 125 | 1,042 | 3 | 0,883 | 135 | 1,125 |
| 4 | 2,798 | 130 | 1,083 | 4 | 2,245 | 140 | 1,167 | 4 | 1,395 | 145 | 1,208 | 4 | 1,221 | 135 | 1,125 | 4 | 0,931 | 140 | 1,167 |
| 5 | 3,031 | 140 | 1,167 | 5 | 2,245 | 145 | 1,208 | 5 | 1,561 | 155 | 1,292 | 5 | 1,397 | 160 | 1,333 | 5 | 0,931 | 125 | 1,042 |
| 6 | 3,031 | 145 | 1,208 | 6 | 2,440 | 165 | 1,375 | 6 | 1,628 | 145 | 1,208 | 6 | 1,397 | 145 | 1,208 | 6 | 0,931 | 145 | 1,208 |
| 7 | 3,913 | 160 | 1,333 | 7 | 2,440 | 160 | 1,333 | 7 | 1,628 | 140 | 1,167 | 7 | 1,397 | 170 | 1,417 | 7 | 0,954 | 150 | 1,250 |
| 8 | 3,913 | 165 | 1,375 | 8 | 2,745 | 150 | 1,250 | 8 | 1,746 | 140 | 1,167 | 8 | 1,710 | 155 | 1,292 | 8 | 1,104 | 165 | 1,375 |
| 9 | 3,913 | 150 | 1,250 | 9 | 2,793 | 165 | 1,375 | 9 | 1,746 | 145 | 1,208 | 9 | 1,901 | 150 | 1,250 | 9 | 1,164 | 160 | 1,333 |
| 10 | 4,001 | 145 | 1,208 | 10 | 2,793 | 160 | 1,333 | 10 | 1,861 | 140 | 1,167 | 10 | 1,955 | 175 | 1,458 | 10 | 1,164 | 165* | 1,375 |
| 11 | 4,001 | 140 | 1,167 | 11 | 3,173 | 155 | 1,292 | 11 | 1,861 | 150 | 1,250 | 11 | 2,166 | 165 | 1,375 | 11 | 1,221 | 180 | 1,500 |
| 12 | 4,892 | 165 | 1,375 | 12 | 3,662 | 150 | 1,250 | 12 | 1,952 | 160 | 1,333 | 12 | 2,750 | 175 | 1,458 | 12 | 1,221 | 170 | 1,417 |
| 13 | 4,892 | 180 | 1,500 | 13 | 3,906 | 170 | 1,417 | 13 | 2,039 | 140 | 1,167 | 13 | 2,798 | 180 | 1,500 | 13 | 1,326 | 160 | 1,333 |
| 14 | 4,892 | 185 | 1,542 | 14 | 3,906 | 175 | 1,458 | 14 | 2,039 | 145 | 1,208 | 14 | 2,798 | 170 | 1,417 | 14 | 1,397 | 170 | 1,417 |
| 15 | 5,131 | 170 | 1,417 | 15 | 4,657 | 180 | 1,500 | 15 | 2,685 | 170 | 1,417 | 15 | 3,369 | 180 | 1,500 | 15 | 1,710 | 185 | 1,542 |
| 16 | 5,598 | 180 | 1,500 | 16 | 4,657 | 175 | 1,458 | 16 | 2,793 | 160 | 1,333 | 16 | 3,965 | 200 | 1,667 | 16 | 2,042 | 190 | 1,583 |
| 17 | 5,598 | 185 | 1,542 | 17 | 5,821 | 210 | 1,750 | 17 | 2,793 | 165 | 1,375 | 17 | 4,087 | 190 | 1,583 | 17 | 2,042 | 195 | 1,625 |
| 18 | 5,871 | 175 | 1,458 | 18 | 6,054 | 220 | 1,833 | 18 | 3,059 | 170 | 1,417 | 18 | 4,665 | 200 | 1,667 | 18 | 2,149 | 190 | 1,583 |
| 19 | 6,065 | 190 | 1,583 | 19 | 6,520 | 230 | 1,917 | 19 | 3,259 | 160 | 1,333 | 19 | 4,665 | 210 | 1,750 | 19 | 2,798 | 210 | 1,750 |
| 20 | 7,465 | 210 | 1,750 | 20 | 6,520 | 210 | 1,750 | 20 | 3,259 | 165 | 1,375 | 20 | 5,598 | 230 | 1,917 | 20 | 2,867 | 210 | 1,750 |
| 21 | 7,465 | 220 | 1,833 | 21 | 6,520 | 240 | 2,000 | 21 | 3,725 | 185 | 1,542 | 21 | 5,621 | 230 | 1,917 | 21 | 2,867 | 215 | 1,792 |
| 22 | 7,465 | 240 | 2,000 | 22 | 6,520 | 215 | 1,792 | 22 | 4,425 | 180 | 1,500 | 22 | 5,621 | 240 | 2,000 | 22 | 3,264 | 240 | 2,000 |
| 23 | 8,178 | 230 | 1,917 | 23 | 7,918 | 260 | 2,167 | 23 | 4,994 | 180 | 1,500 | 23 | 6,003 | 250 | 2,083 | 23 | 3,264 | 230 | 1,917 |
| 24 | 9,200 | 240 | 2,000 | 24 | 8,384 | 230 | 1,917 | 24 | 5,123 | 200 | 1,667 | 24 | 6,532 | 250 | 2,083 | 24 | 4,087 | 250 | 2,083 |
| | | | | | | | | 25 | 5,588 | 190 | 1,583 | | | | | 25 | 4,665 | 270 | 2,250 |
| | | | | | | | | 26 | 5,726 | 200 | 1,667 | | | | | 26 | 4,665 | 280 | 2,333 |
| | | | | | | | | 27 | 6,986 | 240 | 2,000 | | | | | 27 | 5,131 | 280 | 2,333 |
| | | | | | | | | 28 | 8,163 | 270 | 2,250 | | | | | 28 | 5,311 | 290 | 2,417 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 29 | 6,022 | 290 | 2,417 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 30 | 6,022 | 300 | 2,500 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 31 | 6,532 | 290 | 2,417 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 32 | 7,465 | 370 | 3,083 |

TABLEAU A.4.22. Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série IX.

| Série IX: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.82$ $H_{st} = 120 \text{ mm}$ $T = 288 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|------------|---------------|
| $L = 4.57 \text{ Kg/m}^2 \cdot s$ | | | | $L = 10.23 \text{ Kg/m}^2 \cdot s$ | | | | $L = 15.84 \text{ Kg/m}^2 \cdot s$ | | | | $L = 20.94 \text{ Kg/m}^2 \cdot s$ | | | | $L = 27.90 \text{ Kg/m}^2 \cdot s$ | | | |
| N° | G [Kg/m ² s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 2,207 | 135 | 1,125 | 1 | 1,463 | 125 | 1,042 | 1 | 1,162 | 125 | 1,042 | 1 | 1,162 | 140 | 1,167 | 1 | 1,133 | 160 | 1,333 |
| 2 | 2,207 | 130 | 1,083 | 2 | 1,628 | 130 | 1,083 | 2 | 1,162 | 130 | 1,083 | 2 | 1,162 | 135 | 1,125 | 2 | 1,350 | 170 | 1,417 |
| 3 | 2,478 | 140 | 1,167 | 3 | 1,628 | 125 | 1,042 | 3 | 1,395 | 145 | 1,208 | 3 | 1,395 | 150 | 1,250 | 3 | 1,350 | 180 | 1,500 |
| 4 | 2,495 | 140 | 1,167 | 4 | 1,628 | 135 | 1,125 | 4 | 2,039 | 155 | 1,292 | 4 | 1,395 | 155 | 1,292 | 4 | 1,496 | 170 | 1,417 |
| 5 | 2,495 | 135 | 1,125 | 5 | 1,628 | 140 | 1,167 | 5 | 2,039 | 160 | 1,333 | 5 | 1,952 | 170 | 1,417 | 5 | 1,952 | 200 | 1,667 |
| 6 | 2,850 | 150 | 1,250 | 6 | 1,861 | 160 | 1,333 | 6 | 2,081 | 155 | 1,292 | 6 | 1,952 | 160 | 1,333 | 6 | 2,122 | 200 | 1,667 |
| 7 | 2,850 | 155 | 1,292 | 7 | 1,861 | 150 | 1,250 | 7 | 2,081 | 155 | 1,292 | 7 | 2,649 | 170 | 1,417 | 7 | 2,327 | 200 | 1,667 |
| 8 | 3,059 | 160 | 1,333 | 8 | 2,094 | 150 | 1,250 | 8 | 2,245 | 150 | 1,250 | 8 | 2,649 | 175 | 1,458 | 8 | 2,862 | 230 | 1,917 |
| 9 | 3,059 | 150 | 1,250 | 9 | 2,094 | 155 | 1,292 | 9 | 2,245 | 160 | 1,333 | | | | | 9 | 2,862 | 220 | 1,833 |
| 10 | 3,173 | 150 | 1,250 | 10 | 2,327 | 150 | 1,250 | 10 | 2,704 | 175 | 1,458 | | | | | 10 | 3,994 | 230 | 1,917 |
| 11 | 3,173 | 155 | 1,292 | 11 | 2,440 | 160 | 1,333 | 11 | 2,704 | 170 | 1,417 | | | | | | | | |
| 12 | 3,315 | 160 | 1,333 | 12 | 2,549 | 150 | 1,250 | 12 | 2,793 | 160 | 1,333 | | | | | | | | |
| 13 | 3,315 | 150 | 1,250 | 13 | 2,560 | 150 | 1,250 | 13 | 2,793 | 170 | 1,417 | | | | | | | | |
| 14 | 3,492 | 155 | 1,292 | 14 | 2,929 | 150 | 1,250 | 14 | 2,804 | 165 | 1,375 | | | | | | | | |
| 15 | 4,080 | 170 | 1,417 | 15 | 2,995 | 160 | 1,333 | 15 | 2,804 | 160 | 1,333 | | | | | | | | |
| 16 | 4,080 | 160 | 1,333 | 16 | 2,995 | 170 | 1,417 | 16 | 3,059 | 150 | 1,250 | | | | | | | | |
| 17 | 4,395 | 165 | 1,333 | 17 | 3,418 | 150 | 1,250 | 17 | 3,059 | 160 | 1,333 | | | | | | | | |
| 18 | 4,395 | 165 | 1,375 | 18 | 3,817 | 170 | 1,417 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 6,520 | 190 | 1,583 | 19 | 3,817 | 175 | 1,458 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 6,520 | 200 | 1,667 | 20 | 4,657 | 160 | 1,333 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 6,520 | 195 | 1,625 | 21 | 4,657 | 150 | 1,250 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 6,632 | 190 | 1,583 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 6,632 | 200 | 1,667 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 8,837 | 260 | 2,167 | | | | | | | | | | | | | | | | |

TABLEAU A.4.23. Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série XI.

| Série XI: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 90 \text{ mm}$ $T = 287 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst |
| | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] |
| 1 | 2,482 | 105 | 1,167 | 1 | 1,593 | 95 | 1,056 | 1 | 1,221 | 100 | 1,111 | 1 | 1,164 | 100 | 1,111 | 1 | 0,624 | 95 | 1,056 |
| 2 | 2,798 | 105 | 1,167 | 2 | 1,711 | 95 | 1,056 | 2 | 1,624 | 100 | 1,111 | 2 | 1,164 | 95 | 1,056 | 2 | 0,907 | 100 | 1,111 |
| 3 | 2,798 | 100 | 1,111 | 3 | 1,864 | 115 | 1,278 | 3 | 1,624 | 105 | 1,167 | 3 | 1,327 | 110 | 1,222 | 3 | 0,907 | 110 | 1,222 |
| 4 | 3,127 | 105 | 1,167 | 4 | 1,864 | 110 | 1,222 | 4 | 1,631 | 110 | 1,222 | 4 | 1,531 | 115 | 1,278 | 4 | 0,931 | 105 | 1,167 |
| 5 | 3,127 | 110 | 1,222 | 5 | 1,864 | 100 | 1,111 | 5 | 1,631 | 105 | 1,167 | 5 | 1,531 | 110 | 1,222 | 5 | 1,041 | 110 | 1,222 |
| 6 | 3,731 | 110 | 1,222 | 6 | 2,098 | 115 | 1,278 | 6 | 1,864 | 110 | 1,222 | 6 | 2,166 | 120 | 1,333 | 6 | 1,140 | 105 | 1,167 |
| 7 | 4,302 | 120 | 1,333 | 7 | 2,098 | 110 | 1,222 | 7 | 1,864 | 115 | 1,278 | 7 | 2,166 | 125 | 1,389 | 7 | 1,164 | 115 | 1,278 |
| 8 | 4,599 | 120 | 1,333 | 8 | 2,331 | 120 | 1,333 | 8 | 1,955 | 105 | 1,167 | 8 | 2,553 | 115 | 1,278 | 8 | 1,164 | 110 | 1,222 |
| 9 | 4,665 | 125 | 1,389 | 9 | 2,388 | 115 | 1,278 | 9 | 2,445 | 115 | 1,278 | 9 | 2,708 | 135 | 1,500 | 9 | 1,221 | 110 | 1,222 |
| 10 | 4,665 | 130 | 1,444 | 10 | 2,388 | 110 | 1,222 | 10 | 2,934 | 125 | 1,389 | 10 | 2,708 | 140 | 1,556 | 10 | 1,397 | 120 | 1,333 |
| 11 | 4,665 | 120 | 1,333 | 11 | 2,934 | 115 | 1,278 | 11 | 2,934 | 120 | 1,333 | 11 | 3,000 | 135 | 1,500 | 11 | 1,397 | 115 | 1,278 |
| 12 | 4,793 | 120 | 1,333 | 12 | 2,934 | 120 | 1,333 | 12 | 3,731 | 135 | 1,500 | 12 | 3,264 | 130 | 1,444 | 12 | 1,466 | 120 | 1,333 |
| 13 | 5,131 | 130 | 1,444 | 13 | 3,913 | 140 | 1,556 | 13 | 3,731 | 130 | 1,444 | 13 | 3,501 | 150 | 1,667 | 13 | 1,531 | 130 | 1,444 |
| 14 | 6,532 | 160 | 1,778 | 14 | 3,913 | 130 | 1,444 | 14 | 4,254 | 125 | 1,389 | 14 | 3,501 | 140 | 1,556 | 14 | 1,864 | 135 | 1,500 |
| 15 | 6,850 | 150 | 1,667 | 15 | 4,001 | 120 | 1,333 | 15 | 4,254 | 125 | 1,389 | 15 | 3,731 | 150 | 1,667 | 15 | 1,864 | 125 | 1,389 |
| 16 | 6,850 | 160 | 1,778 | 16 | 4,431 | 120 | 1,333 | 16 | 4,302 | 140 | 1,556 | 16 | 3,731 | 160 | 1,778 | 16 | 1,864 | 140 | 1,556 |
| 17 | 6,998 | 160 | 1,778 | 17 | 4,665 | 125 | 1,389 | 17 | 4,665 | 150 | 1,667 | 17 | 3,751 | 135 | 1,500 | 17 | 1,999 | 140 | 1,556 |
| 18 | 6,998 | 150 | 1,667 | 18 | 4,892 | 140 | 1,556 | 18 | 4,892 | 130 | 1,444 | 18 | 4,198 | 150 | 1,667 | 18 | 2,331 | 150 | 1,667 |
| 19 | 7,465 | 170 | 1,889 | 19 | 4,892 | 135 | 1,500 | 19 | 5,598 | 140 | 1,556 | 19 | 4,254 | 150 | 1,667 | 19 | 2,331 | 155 | 1,722 |
| 20 | 9,200 | 200 | 2,222 | 20 | 5,110 | 150 | 1,667 | 20 | 6,065 | 160 | 1,778 | 20 | 4,254 | 145 | 1,611 | 20 | 2,798 | 145 | 1,611 |
| | | | | 21 | 5,598 | 145 | 1,611 | 21 | 6,532 | 175 | 1,944 | 21 | 4,892 | 170 | 1,889 | 21 | 3,065 | 155 | 1,722 |
| | | | | 22 | 5,832 | 135 | 1,500 | 22 | 6,532 | 170 | 1,889 | 22 | 4,892 | 180 | 2,000 | 22 | 3,731 | 175 | 1,944 |
| | | | | 23 | 5,832 | 140 | 1,556 | 23 | 6,532 | 175 | 1,944 | 23 | 5,002 | 160 | 1,778 | 23 | 3,731 | 170 | 1,889 |
| | | | | 24 | 6,532 | 160 | 1,778 | 24 | 7,699 | 230 | 2,556 | 24 | 5,598 | 175 | 1,944 | 24 | 4,087 | 165 | 1,833 |
| | | | | 25 | 6,532 | 150 | 1,667 | | | | | 25 | 5,598 | 180 | 2,000 | 25 | 4,198 | 180 | 2,000 |
| | | | | 26 | 8,178 | 220 | 2,444 | | | | | | | | | 26 | 4,198 | 170 | 1,889 |
| | | | | 27 | 8,178 | 230 | 2,556 | | | | | | | | | 27 | 5,110 | 180 | 2,000 |
| | | | | 28 | 8,809 | 240 | 2,667 | | | | | | | | | 28 | 5,131 | 200 | 2,222 |
| | | | | 29 | 8,809 | 230 | 2,556 | | | | | | | | | 29 | 5,131 | 190 | 2,111 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 30 | 5,311 | 200 | 2,222 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 31 | 5,311 | 210 | 2,333 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 32 | 5,598 | 230 | 2,556 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 33 | 5,754 | 220 | 2,444 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 34 | 5,754 | 230 | 2,556 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 35 | 5,832 | 210 | 2,333 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 36 | 6,361 | 210 | 2,333 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 37 | 6,361 | 220 | 2,444 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 38 | 6,532 | 260 | 2,889 |

TABLEAU A.4.24. Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série XIII.

| Série XIII: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.32$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------------------------------|----|------------------------|------|--------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | | |
| N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst |
| | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] |
| 1 | 2,399 | 65 | 1,083 | 1 | 1,959 | 65 | 1,083 | 1 | 1,021 | 65 | 1,083 | 1 | 0,796 | 65 | 1,083 | 1 | 0,699 | 75 | 1,250 |
| 2 | 3,195 | 70 | 1,167 | 2 | 2,153 | 75 | 1,250 | 2 | 1,142 | 70 | 1,167 | 2 | 0,911 | 65 | 1,083 | 2 | 0,699 | 70 | 1,167 |
| 3 | 3,256 | 70 | 1,167 | 3 | 2,204 | 75 | 1,250 | 3 | 1,142 | 65 | 1,083 | 3 | 0,978 | 75 | 1,250 | 3 | 0,932 | 85 | 1,417 |
| 4 | 3,830 | 75 | 1,250 | 4 | 2,393 | 85 | 1,417 | 4 | 1,166 | 70 | 1,167 | 4 | 0,978 | 80 | 1,333 | 4 | 0,932 | 90 | 1,500 |
| 5 | 4,061 | 75 | 1,250 | 5 | 2,393 | 80 | 1,333 | 5 | 1,166 | 75 | 1,250 | 5 | 1,000 | 75 | 1,250 | 5 | 0,978 | 90 | 1,500 |
| 6 | 4,262 | 80 | 1,333 | 6 | 2,929 | 105 | 1,750 | 6 | 1,223 | 80 | 1,333 | 6 | 1,021 | 80 | 1,333 | 6 | 1,318 | 90 | 1,500 |
| 7 | 4,262 | 75 | 1,250 | 7 | 2,929 | 100 | 1,667 | 7 | 1,223 | 75 | 1,250 | 7 | 1,250 | 80 | 1,333 | 7 | 1,400 | 120 | 2,000 |
| 8 | 4,411 | 80 | 1,333 | 8 | 3,070 | 100 | 1,667 | 8 | 1,752 | 90 | 1,500 | 8 | 1,250 | 85 | 1,417 | 8 | 1,400 | 130 | 2,167 |
| 9 | 4,579 | 80 | 1,333 | 9 | 3,256 | 100 | 1,667 | 9 | 1,752 | 100 | 1,667 | 9 | 1,285 | 80 | 1,333 | 9 | 1,468 | 150 | 2,500 |
| 10 | 4,673 | 80 | 1,333 | 10 | 3,256 | 110 | 1,833 | 10 | 1,867 | 100 | 1,667 | 10 | 1,400 | 90 | 1,500 | 10 | 1,656 | 150 | 2,500 |
| 11 | 5,224 | 80 | 1,333 | 11 | 3,270 | 100 | 1,667 | 11 | 1,867 | 90 | 1,500 | 11 | 1,400 | 95 | 1,583 | 11 | 1,714 | 150 | 2,500 |
| 12 | 5,224 | 85 | 1,417 | 12 | 3,582 | 110 | 1,833 | 12 | 2,129 | 110 | 1,833 | 12 | 1,656 | 100 | 1,667 | 12 | 1,714 | 160 | 2,667 |
| 13 | 5,328 | 85 | 1,417 | 13 | 3,675 | 110 | 1,833 | 13 | 2,170 | 110 | 1,833 | 13 | 1,656 | 95 | 1,583 | 13 | 2,053 | 170 | 2,833 |
| 14 | 5,328 | 80 | 1,333 | 14 | 3,738 | 110 | 1,833 | 14 | 2,335 | 120 | 2,000 | 14 | 1,867 | 140 | 2,333 | 14 | 2,101 | 170 | 2,833 |
| 15 | 6,076 | 90 | 1,500 | 15 | 3,738 | 120 | 2,000 | 15 | 2,335 | 125 | 2,083 | 15 | 2,003 | 125 | 2,083 | 15 | 2,287 | 185 | 3,083 |
| 16 | 6,076 | 95 | 1,583 | 16 | 3,830 | 110 | 1,833 | 16 | 2,504 | 120 | 2,000 | 16 | 2,003 | 130 | 2,167 | 16 | 2,287 | 180 | 3,000 |
| 17 | 6,705 | 105 | 1,750 | 17 | 4,439 | 125 | 2,083 | 17 | 2,505 | 120 | 2,000 | 17 | 2,204 | 150 | 2,500 | 17 | 2,505 | 190 | 3,167 |
| 18 | 6,705 | 100 | 1,667 | 18 | 4,439 | 120 | 2,000 | 18 | 2,540 | 130 | 2,167 | 18 | 2,210 | 150 | 2,500 | 18 | 2,569 | 200 | 3,333 |
| 19 | 7,478 | 110 | 1,833 | 19 | 4,675 | 120 | 2,000 | 19 | 2,803 | 130 | 2,167 | 19 | 2,803 | 130 | 2,167 | 19 | 3,070 | 210 | 3,500 |
| 20 | 8,413 | 130 | 2,167 | 20 | 4,795 | 125 | 2,083 | 20 | 3,133 | 130 | 2,167 | 20 | 2,803 | 150 | 2,500 | 20 | 3,256 | 210 | 3,500 |
| 21 | 8,413 | 140 | 2,333 | 21 | 4,795 | 120 | 2,000 | 21 | 3,504 | 140 | 2,333 | 21 | 2,803 | 155 | 2,583 | 21 | 3,432 | 240 | 4,000 |
| 22 | 9,955 | 190 | 3,167 | 22 | 5,140 | 120 | 2,000 | 22 | 4,205 | 150 | 2,500 | 22 | 3,256 | 140 | 2,333 | 22 | 3,432 | 250 | 4,167 |
| 23 | 9,955 | 180 | 3,000 | 23 | 5,608 | 135 | 2,250 | 23 | 4,673 | 150 | 2,500 | 23 | 3,351 | 170 | 2,833 | 23 | 3,582 | 235 | 3,917 |
| | | | | 24 | 5,608 | 130 | 2,167 | 24 | 4,788 | 150 | 2,500 | 24 | 3,869 | 160 | 2,667 | 24 | 3,582 | 230 | 3,833 |
| | | | | 25 | 6,543 | 150 | 2,500 | 25 | 4,788 | 160 | 2,667 | 25 | 3,920 | 155 | 2,583 | 25 | 3,971 | 260 | 4,333 |
| | | | | 26 | 6,543 | 160 | 2,667 | 26 | 5,140 | 150 | 2,500 | 26 | 3,920 | 155 | 2,583 | 26 | 3,971 | 250 | 4,167 |
| | | | | 27 | 7,843 | 190 | 3,167 | 27 | 5,140 | 160 | 2,667 | 27 | 4,205 | 170 | 2,833 | 27 | 4,094 | 260 | 4,333 |
| | | | | 28 | 7,843 | 180 | 3,000 | 28 | 6,076 | 180 | 3,000 | 28 | 4,205 | 190 | 3,167 | 28 | 4,094 | 270 | 4,500 |
| | | | | | | | | 29 | 6,076 | 210 | 3,500 | 29 | 4,673 | 200 | 3,333 | 29 | 4,205 | 270 | 4,500 |
| | | | | | | | | 30 | 6,076 | 200 | 3,333 | 30 | 4,673 | 210 | 3,500 | 30 | 4,578 | 280 | 4,667 |
| | | | | | | | | 31 | 6,543 | 250 | 4,167 | 31 | 5,140 | 230 | 3,833 | 31 | 4,578 | 270 | 4,500 |
| | | | | | | | | 32 | 7,011 | 250 | 4,167 | 32 | 5,140 | 240 | 4,000 | 32 | 4,673 | 310 | 5,167 |
| | | | | | | | | 33 | 7,011 | 240 | 4,000 | 33 | 6,076 | 260 | 4,333 | 33 | 4,673 | 320 | 5,333 |
| | | | | | | | | 34 | 7,478 | 300 | 5,000 | 34 | 6,076 | 270 | 4,500 | 34 | 5,119 | 310 | 5,167 |
| | | | | | | | | 35 | 7,478 | 320 | 5,333 | 35 | 6,143 | 270 | 4,500 | 35 | 5,140 | 310 | 5,167 |
| | | | | | | | | 36 | 7,946 | 400 | 6,667 | 36 | 6,143 | 260 | 4,333 | 36 | 5,608 | 370 | 6,167 |
| | | | | | | | | 37 | 7,946 | 390 | 6,500 | 37 | 6,543 | 310 | 5,167 | 37 | 5,842 | 420 | 7,000 |
| | | | | | | | | | | | | 38 | 7,478 | 440 | 7,333 | 38 | 6,076 | 470 | 7,833 |

TABLEAU A.4.25. Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série XIV.

| Série XIV: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\phi = 0.56$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 286 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] | N° | G [Kg/m ² .s] | Hd [mm] | Hd/Hst [-] |
| 1 | 2,803 | 65 | 1,083 | 1 | 1,867 | 70 | 1,167 | 1 | 1,328 | 70 | 1,167 | 1 | 0,932 | 70 | 1,167 | 1 | 5,512 | 145 | 2,417 |
| 2 | 3,270 | 75 | 1,250 | 2 | 2,204 | 80 | 1,333 | 2 | 1,634 | 75 | 1,250 | 2 | 1,021 | 70 | 1,167 | 2 | 5,746 | 150 | 2,500 |
| 3 | 3,920 | 80 | 1,333 | 3 | 2,335 | 80 | 1,333 | 3 | 1,867 | 80 | 1,333 | 3 | 1,106 | 85 | 1,417 | 3 | 6,076 | 165 | 2,750 |
| 4 | 4,901 | 85 | 1,417 | 4 | 2,335 | 75 | 1,250 | 4 | 1,914 | 85 | 1,417 | 4 | 1,106 | 80 | 1,333 | 4 | 6,543 | 180 | 3,000 |
| 5 | 4,901 | 90 | 1,500 | 5 | 2,449 | 80 | 1,333 | 5 | 2,335 | 90 | 1,500 | 5 | 1,364 | 85 | 1,417 | 5 | 6,862 | 220 | 3,667 |
| 6 | 5,608 | 105 | 1,750 | 6 | 2,449 | 85 | 1,417 | 6 | 2,611 | 90 | 1,500 | 6 | 1,364 | 90 | 1,500 | 6 | 6,862 | 210 | 3,500 |
| 7 | 5,608 | 100 | 1,667 | 7 | 2,814 | 85 | 1,417 | 7 | 3,070 | 95 | 1,583 | 7 | 1,674 | 100 | 1,667 | 7 | 7,011 | 225 | 3,750 |
| 8 | 7,168 | 115 | 1,917 | 8 | 2,814 | 80 | 1,333 | 8 | 3,256 | 90 | 1,500 | 8 | 1,674 | 95 | 1,583 | 8 | 7,843 | 290 | 4,833 |
| 9 | 8,192 | 130 | 2,167 | 9 | 3,036 | 80 | 1,333 | 9 | 3,256 | 95 | 1,583 | 9 | 2,046 | 100 | 1,667 | | | | |
| | | | | 10 | 3,036 | 85 | 1,417 | 10 | 3,504 | 100 | 1,667 | 10 | 2,204 | 105 | 1,750 | | | | |
| | | | | 11 | 3,351 | 90 | 1,500 | 11 | 3,504 | 90 | 1,500 | 11 | 2,204 | 100 | 1,667 | | | | |
| | | | | 12 | 3,351 | 85 | 1,417 | 12 | 3,920 | 95 | 1,583 | 12 | 3,005 | 105 | 1,750 | | | | |
| | | | | 13 | 3,920 | 95 | 1,583 | 13 | 3,920 | 100 | 1,667 | 13 | 3,005 | 110 | 1,833 | | | | |
| | | | | 14 | 4,259 | 100 | 1,667 | 14 | 4,008 | 100 | 1,667 | 14 | 3,133 | 110 | 1,833 | | | | |
| | | | | 15 | 4,259 | 95 | 1,583 | 15 | 4,411 | 110 | 1,833 | 15 | 4,094 | 125 | 2,083 | | | | |
| | | | | 16 | 4,343 | 95 | 1,583 | 16 | 4,788 | 110 | 1,833 | 16 | 4,094 | 130 | 2,167 | | | | |
| | | | | 17 | 4,343 | 100 | 1,667 | 17 | 5,267 | 120 | 2,000 | 17 | 4,351 | 125 | 2,083 | | | | |
| | | | | 18 | 4,655 | 95 | 1,583 | 18 | 5,746 | 120 | 2,000 | 18 | 5,011 | 130 | 2,167 | | | | |
| | | | | 19 | 5,746 | 115 | 1,917 | 19 | 5,764 | 130 | 2,167 | 19 | 5,011 | 135 | 2,250 | | | | |
| | | | | 20 | 5,746 | 110 | 1,833 | 20 | 5,764 | 125 | 2,083 | 20 | 6,014 | 140 | 2,333 | | | | |
| | | | | 21 | 6,394 | 120 | 2,000 | 21 | 6,076 | 130 | 2,167 | 21 | 6,543 | 155 | 2,583 | | | | |
| | | | | 22 | 6,543 | 135 | 2,250 | 22 | 8,192 | 170 | 2,833 | 22 | 6,862 | 160 | 2,667 | | | | |
| | | | | 23 | 6,543 | 130 | 2,167 | | | | | 23 | 6,862 | 170 | 2,833 | | | | |
| | | | | 24 | 7,478 | 140 | 2,333 | | | | | 24 | 7,478 | 210 | 3,500 | | | | |
| | | | | 25 | 7,478 | 145 | 2,417 | | | | | | | | | | | | |

TABLEAU A.4.26. Résultats des mesures de l'expansion du lit (Hd/Hst), Série XV.

| Série XV: $\rho_p = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p = 15 \text{ mm}$ $\varphi = 0.82$ $H_{st} = 60 \text{ mm}$ $T = 288 \text{ K}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|--------------------------------|------------------------|------|--------|
| L = 4.57 Kg/m ² .s | | | | L = 10.23 Kg/m ² .s | | | | L = 15.84 Kg/m ² .s | | | | L = 20.94 Kg/m ² .s | | | | L = 27.90 Kg/m ² .s | | | |
| N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst | N° | G | Hd | Hd/Hst |
| | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] | | [Kg/m ² .s] | [mm] | [-] |
| 1 | 2,995 | 65 | 1,083 | 1 | 2,327 | 70 | 1,167 | 1 | 1,162 | 65 | 1,083 | 1 | 0,881 | 70 | 1,167 | 1 | 0,439 | 65 | 1,083 |
| 2 | 3,135 | 70 | 1,167 | 2 | 2,433 | 75 | 1,250 | 2 | 1,191 | 65 | 1,083 | 2 | 1,102 | 70 | 1,167 | 2 | 0,681 | 70 | 1,167 |
| 3 | 3,135 | 65 | 1,083 | 3 | 2,433 | 80 | 1,333 | 3 | 1,360 | 70 | 1,167 | 3 | 1,102 | 75 | 1,250 | 3 | 0,713 | 80 | 1,333 |
| 4 | 3,904 | 80 | 1,333 | 4 | 3,059 | 90 | 1,500 | 4 | 1,395 | 70 | 1,167 | 4 | 1,591 | 80 | 1,333 | 4 | 0,952 | 85 | 1,417 |
| 5 | 4,164 | 75 | 1,250 | 5 | 3,059 | 85 | 1,417 | 5 | 1,528 | 70 | 1,167 | 5 | 1,591 | 75 | 1,250 | 5 | 0,952 | 80 | 1,333 |
| 6 | 4,591 | 75 | 1,250 | 6 | 3,173 | 80 | 1,333 | 6 | 1,587 | 75 | 1,250 | 6 | 1,926 | 90 | 1,500 | 6 | 1,115 | 80 | 1,333 |
| 7 | 5,841 | 100 | 1,667 | 7 | 3,643 | 85 | 1,417 | 7 | 1,587 | 70 | 1,167 | 7 | 2,039 | 90 | 1,500 | 7 | 1,115 | 85 | 1,417 |
| 8 | 6,122 | 90 | 1,500 | 8 | 3,643 | 80 | 1,333 | 8 | 2,081 | 75 | 1,250 | 8 | 2,039 | 80 | 1,333 | 8 | 1,463 | 100 | 1,667 |
| 9 | 6,122 | 100 | 1,667 | 9 | 3,906 | 80 | 1,333 | 9 | 2,081 | 80 | 1,333 | 9 | 2,327 | 90 | 1,500 | 9 | 1,463 | 90 | 1,500 |
| 10 | 6,903 | 115 | 1,917 | 10 | 3,906 | 85 | 1,417 | 10 | 2,094 | 85 | 1,417 | 10 | 2,327 | 95 | 1,583 | 10 | 1,560 | 90 | 1,500 |
| 11 | 6,903 | 110 | 1,833 | 11 | 4,591 | 80 | 1,333 | 11 | 2,094 | 80 | 1,333 | 11 | 2,390 | 90 | 1,500 | 11 | 1,560 | 100 | 1,667 |
| | | | | 12 | 4,591 | 90 | 1,500 | 12 | 2,122 | 75 | 1,250 | 12 | 2,995 | 90 | 1,500 | 12 | 1,628 | 100 | 1,667 |
| | | | | 13 | 4,657 | 95 | 1,583 | 13 | 2,653 | 80 | 1,333 | 13 | 3,245 | 115 | 1,917 | 13 | 1,628 | 90 | 1,500 |
| | | | | 14 | 4,657 | 90 | 1,500 | 14 | 2,871 | 90 | 1,500 | 14 | 3,245 | 110 | 1,833 | 14 | 1,952 | 100 | 1,667 |
| | | | | 15 | 4,657 | 100 | 1,667 | 15 | 2,929 | 90 | 1,500 | 15 | 3,304 | 90 | 1,500 | 15 | 1,952 | 110 | 1,833 |
| | | | | 16 | 5,447 | 105 | 1,750 | 16 | 2,929 | 80 | 1,333 | 16 | 3,304 | 100 | 1,667 | 16 | 1,996 | 100 | 1,667 |
| | | | | 17 | 5,447 | 100 | 1,667 | 17 | 3,059 | 90 | 1,500 | 17 | 3,533 | 100 | 1,667 | 17 | 1,996 | 95 | 1,583 |
| | | | | 18 | 6,054 | 100 | 1,667 | 18 | 3,059 | 95 | 1,583 | 18 | 3,904 | 100 | 1,667 | 18 | 2,327 | 100 | 1,667 |
| | | | | 19 | 6,054 | 110 | 1,833 | 19 | 3,418 | 80 | 1,333 | 19 | 3,904 | 110 | 1,833 | 19 | 2,327 | 110 | 1,833 |
| | | | | | | | | 20 | 3,418 | 75 | 1,250 | 20 | 4,080 | 115 | 1,917 | 20 | 2,428 | 110 | 1,833 |
| | | | | | | | | 21 | 3,744 | 90 | 1,500 | 21 | 4,080 | 110 | 1,833 | 21 | 2,428 | 100 | 1,667 |
| | | | | | | | | 22 | 3,744 | 100 | 1,667 | 22 | 4,191 | 90 | 1,500 | 22 | 2,862 | 110 | 1,833 |
| | | | | | | | | 23 | 4,080 | 85 | 1,417 | 23 | 4,191 | 100 | 1,667 | 23 | 2,949 | 115 | 1,917 |
| | | | | | | | | 24 | 4,080 | 80 | 1,333 | 24 | 4,562 | 100 | 1,667 | 24 | 2,949 | 110 | 1,833 |
| | | | | | | | | 25 | 4,994 | 100 | 1,667 | 25 | 4,562 | 90 | 1,500 | 25 | 3,092 | 110 | 1,833 |
| | | | | | | | | 26 | 4,994 | 95 | 1,583 | 26 | 5,123 | 100 | 1,667 | 26 | 3,092 | 120 | 2,000 |
| | | | | | | | | 27 | 5,101 | 90 | 1,500 | 27 | 5,123 | 110 | 1,833 | 27 | 3,906 | 130 | 2,167 |
| | | | | | | | | 28 | 5,101 | 100 | 1,667 | 28 | 5,132 | 110 | 1,833 | 28 | 4,772 | 130 | 2,167 |
| | | | | | | | | 29 | 6,122 | 115 | 1,917 | 29 | 5,132 | 105 | 1,750 | 29 | 4,772 | 140 | 2,333 |
| | | | | | | | | 30 | 6,122 | 110 | 1,833 | 30 | 5,447 | 90 | 1,500 | 30 | 6,054 | 150 | 2,500 |
| | | | | | | | | | | | | 31 | 5,447 | 100 | 1,667 | 31 | 6,054 | 140 | 2,333 |
| | | | | | | | | | | | | 32 | 5,861 | 120 | 2,000 | 32 | 8,497 | 320 | 5,333 |
| | | | | | | | | | | | | 33 | 6,054 | 120 | 2,000 | 33 | 9,127 | 390 | 6,500 |
| | | | | | | | | | | | | 34 | 6,054 | 130 | 2,167 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 35 | 7,452 | 160 | 2,667 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 36 | 7,452 | 150 | 2,500 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 37 | 7,452 | 170 | 2,833 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 38 | 8,837 | 230 | 3,833 | | | | |

ANNEXE A5 : valeurs de la vitesse minimum de fluidisation

Tableau A.5.

| Garnissage | Hauteur statique (Hst) [mm] | % d'aire libre de la grille (φ) | Flux liquide [Kg/m ² .s] | | | | | |
|--|-----------------------------|---|--|-------|-------|-------|-------|------|
| | | | 4,57 | 10,23 | 15,84 | 20,94 | 27,90 | |
| | | | Vitesse minimum de fluidisation (Gmf) [Kg/m ² .s] | | | | | |
| (I) $\rho_p(I) = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p(I) = 10 \text{ mm}$ | 60 | 32 | 2,10 | 1,70 | 1,40 | 1,20 | 1,05 | |
| | | 56 | 2,20 | 1,80 | 1,65 | 1,50 | 1,40 | |
| | | 82 | 2,40 | 2,05 | 1,90 | 1,85 | 1,65 | |
| | 90 | 32 | 2,20 | 1,90 | 1,60 | 1,40 | 1,20 | |
| | | 56 | 2,60 | 2,20 | 2,00 | 1,60 | 1,50 | |
| | | 82 | 2,90 | 2,60 | 2,20 | 2,00 | 1,85 | |
| (II) $\rho_p(II) = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p(II) = 15 \text{ mm}$ | 60 | 32 | 2,35 | 2,00 | 1,45 | 1,20 | 0,95 | |
| | | 56 | 2,45 | 2,30 | 2,05 | 1,90 | 1,70 | |
| | | 82 | 2,80 | 2,65 | 2,50 | 2,30 | 2,10 | |
| | 90 | 56 | 2,35 | 2,10 | 1,90 | 1,70 | 1,60 | |
| | | 120 | 32 | 2,00 | 1,80 | 1,60 | 1,40 | 1,20 |
| | | | 56 | 2,30 | 2,15 | 2,00 | 1,85 | 1,70 |
| 82 | 2,50 | | 2,35 | 2,20 | 2,05 | 1,90 | | |

ANNEXE A.6

Résultats du calcul des pentes des équations représentant les zones de variation de l'expansion du lit :

Tableau A.6.

| $\rho_p = 868 \text{ Kg/m}^3$, $d_p = 10 \text{ mm}$, $\varphi = 0,56$, $H_{st} = 90 \text{ mm}$ | | | |
|---|--|---|--|
| Zone | Flux liquide (L) [Kg/m ² .s] | Domaine de variation du flux gazeux (G) [Kg/m ² .s] | Equation $\left(\frac{H_d}{H_{st}}\right) = f(G)$ |
| (I) (II) (III) | 4,57 | 1,999 ≤ G ≤ 2,165 2,391 ≤ G ≤ 6,998 6,998 ≤ G ≤ 9,200 | y = 0,409x + 0,261 y = 0,137x + 0,839 y = 0,384x - 0,888 |
| (I) (II) (III) | 10,23 | 1,394 ≤ G ≤ 2,04 2,042 ≤ G ≤ 6,531 6,531 ≤ G ≤ 8,398 | y = 0,479 + 0,396 y = 0,161x + 0,976 y = 0,478x - 0,956 |
| (I) (II) (III) | 15,84 | 0,824 ≤ G ≤ 1,910 1,91 ≤ G ≤ 6,409 6,409 ≤ G ≤ 8,177 | y = 0,499x + 0,661 y = 0,205x + 0,170 y = 0,493x - 0,619 |
| (I) (II) (III) | 20,94 | 0,535 ≤ G ≤ 1,325 1,325 ≤ G ≤ 6,531 6,531 ≤ G ≤ 7,829 | y = 0,654x + 0,713 y = 0,332x + 1,055 y = 0,941x - 2,872 |
| (I) (II) (III) | 27,90 | 0,463 ≤ G ≤ 0,967 0,976 ≤ G ≤ 6,531 6,531 ≤ G ≤ 7,829 | y = 1,248x + 0,514 y = 0,371x + 1,350 y = 0,644x - 0,374 |

ANNEXE A.7

Programmes de calcul des corrélations de pertes de charge et de l'expansion du lit

```

REM *****
REM ***** PROGRAMME CORRELATION PERTE DE CHARGE *****
REM *****
RANDOMIZE TIMER
t1 = TIMER
CLS
REM $DYNAMIC
DIM x(2600, 5) AS SINGLE, xt(5, 2600) AS SINGLE, xtx(5, 5) AS SINGLE
DIM xtxi(5, 10) AS SINGLE, itx(5, 5) AS SINGLE
DIM rop(2), hst(3), fi(3), lo(5), ind$(75), dp(2)
DIM y(2600) AS DOUBLE, estimer(5, 1) AS DOUBLE

REM *****
REM **** LECTURE DES DONNEES ****
REM *****

READ rop(1), rop(2)
READ hst(2), hst(3), hst(1)
READ fi(1), fi(2), fi(3)
READ lo(1), lo(2), lo(3), lo(4), lo(5)
READ dc, eps, rog, rol, mug, mul, dp(1), dp(2)

REM *****
REM **** OUVERTURE DES FICHER ****
REM *****

OPEN "i", #1, "indices.dat"
i = 1
DO WHILE NOT EOF(1)
INPUT #1, ind$(i), ind$(i + 1), ind$(i + 2), ind$(i + 3), ind$(i + 4)
i = i + 5
LOOP
CLOSE (1)

REM *****
REM **** ELEMENT ENDOGENES ****
REM *****

donne = 0
s = 1
FOR rp = 1 TO 2
IF rp = 1 THEN hl = 2 ELSE hl = 1
FOR h = hl TO 3
FOR f = 1 TO 2
FOR l = 1 TO 5

```

ANNEXES

```

a$ = "c:\correla7\p72" + ind$(s) + ".dat": PRINT a$
OPEN "i", #1, a$
DO WHILE NOT EOF(1)
donne = donne + 1: PRINT donne
INPUT #1, a, b, c, d, e, ff
x(donne, 1) = 1
x(donne, 2) = LOG(hst(h) / dc)
x(donne, 3) = LOG(fi(f))
x(donne, 4) = LOG(dp(rp) * lo(l) / mul)
x(donne, 5) = LOG(dp(rp) * b / mug)
eps0 = (1 - eps) * rop(rp) * hst(h) * 9.8
y(donne) = LOG(((d * .10204 + eps0) * rog / b ^ 2))
LOOP
CLOSE (1)
s = s + 1
NEXT l
NEXT f
s = s + 5
NEXT h
NEXT rp

REM *****
REM **** CALCUL DE Xt,XtX ****
REM *****

FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO donne
xt(i, j) = x(j, i)
NEXT j
NEXT i

FOR i = 1 TO 5
FOR k = 1 TO 5
FOR j = 1 TO donne
xtx(i, k) = xtx(i, k) + xt(i, j) * x(j, k)
NEXT j
NEXT k
NEXT i

ERASE x

REM *****
REM **** MATRICE INVERSE DE XtX ****
REM *****

REM **** AUGMENTATION IDENTITE ****

FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
xtxi(i, j) = xtx(i, j)
NEXT j
NEXT i

```

ANNEXES

```

FOR i = 1 TO 5
FOR j = 6 TO 10
IF i + 5 = j THEN xtxi(i, j) = 1 ELSE xtxi(i, j) = 0
NEXT j
NEXT i

```

```

FOR k = 1 TO 5
FOR j = 10 TO k STEP -1
xtxi(k, j) = xtxi(k, j) / xtxi(k, k)
NEXT j
FOR j = 10 TO k STEP -1
FOR i = 1 TO 5
IF i = k THEN GOTO 100 ELSE xtxi(i, j) = xtxi(i, j) - xtxi(i, k) * xtxi(k, j)
NEXT i
NEXT j
NEXT k

```

```

DIM ixtxxt(5, 2600) AS SINGLE
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
ixtx(i, j) = xtxi(i, j + 5)
NEXT j
NEXT i
DIM iden(5, 5)
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
FOR k = 1 TO 5
iden(i, j) = iden(i, j) + xtx(i, k) * ixtx(k, j)
NEXT k
IF ABS(iden(i, j)) < .001 THEN iden(i, j) = 0
IF ABS(1 - ABS(iden(i, j))) < .001 THEN iden(i, j) = 1
PRINT iden(i, j);
NEXT j
PRINT
NEXT i

```

```

FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO donne
FOR k = 1 TO 5
ixtxxt(i, j) = ixtxxt(i, j) + ixtx(i, k) * xt(k, j)
NEXT k
NEXT j
NEXT i

```

```

FOR i = 1 TO 5
FOR k = 1 TO donne
estimer(i, 1) = estimer(i, 1) + ixtxxt(i, k) * y(k)
NEXT k
PRINT estimer(i, 1)
NEXT i

```

ANNEXES

```
OPEN "o", #1, "c:\correll10\facteu10.DAT"
FOR i = 1 TO 5
PRINT #1, estimer(i, t)
NEXT i
CLOSE (1)

REM ***** TEMPS D'EXECUTION *****

t2 = TIMER
t = t2 - t1
tm = INT(t / 60)
ts = t - tm * 60
PRINT "temps de calcul : "; tm; " Mn"; ts; " s"

REM *****
REM *** BANQUE DE DONNEES ***
REM *****

DATA 868,736
DATA 0.090,0.06,0.120
DATA .32,.5,.82
DATA 4.57 ,10.23,15.84,20.94,27.90
DATA 0.120,1.85,1000,0.000018,0.0012,.01,.015

REM ***** FIN DU PROGRAMME *****

END
```

ANNEXES

```

REM *****
REM ***** CORRELATION HD/HST *****
REM *****

REM *****
REM ***** METHODE DE GAUSS-NEWTON *****
REM *****

REM *****
REM *
REM *          2      3      a4  a5      *
REM * (HD / HST) = 1+ {a1 G +a2 G + a3 G } F1 L      *
REM *
REM *
REM *****

DIM fi(3), lo(5), dp(2), a(5)
DIM ind$(75)

READ fi(1), fi(2), fi(3)
READ lo(1), lo(2), lo(3), lo(4), lo(5)
READ mul, mug
READ dp(1), dp(2)
READ a(1), a(2), a(3)
OPEN "i", #1, "c:\hst11\paramell.dat"
INPUT #1, a(1), a(2), a(3), a(4), a(5)
CLOSE #1
FOR i = 1 TO 5
PRINT a(i)
NEXT i

i = 1
OPEN "i", #1, "c:\indices.dat"
DO WHILE NOT EOF(1)
INPUT #1, ind$(i), ind$(i + 1), ind$(i + 2), ind$(i + 3), ind$(i + 4)
i = i + 5
LOOP
CLOSE (1)

DO
DIM x(2000, 3) AS SINGLE
DIM y(2000) AS SINGLE
DIM yde(2000) AS SINGLE
donne = 0
s = 1
FOR rp = 1 TO 2
IF rp = 1 THEN hl = 2 ELSE hl = 3
FOR h = 1 TO hl
FOR f = 1 TO 2
FOR l = 1 TO 5

```

ANNEXES

```

a$ = "c:\hstt\pic" + ind$(s) + ".dat"
OPEN "i", #1, a$
DO WHILE NOT EOF(1)

INPUT #1, aa, b, c, d, e, ff
donne = donne + 1
y(donne) = ff
x(donne, 1) = b
x(donne, 2) = fi(ff)
x(donne, 3) = lo(1)
yde(donne) = 1 + {a(1) * x(donne, 1) + a(2) * x(donne, 1) ^ 2 + a(3) * x(donne, 1) ^ 3} * (x(donne, 2) ^ a(4)) *
* (x(donne, 3) ^ a(5))

CLOSE (1)
s = s + 1

NEXT l
NEXT f
s = s + 5
NEXT h
NEXT rp
PRINT "nombre de donnees :"; donne
REM *****
REM MATRICE
REM *****

DIM df(donne, 5) AS SINGLE

FOR i = 1 TO donne
df(i, 1) = x(i, 1) * (x(i, 2) ^ a(4)) * (x(i, 3) ^ a(5))
df(i, 2) = df(i, 1) * x(i, 1)
df(i, 3) = df(i, 2) * x(i, 1)
df(i, 4) = (yde(i) - 1) * LOG(x(i, 2))
df(i, 5) = (yde(i) - 1) * LOG(x(i, 3))
NEXT i

DIM dft(5, donne)
FOR i = 1 TO donne
FOR j = 1 TO 5
dft(j, i) = df(i, j)
NEXT j
NEXT i

DIM pl(5, 5)
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
FOR k = 1 TO donne
pl(i, j) = pl(i, j) + dft(i, k) * df(k, j)
NEXT k
NEXT j
NEXT i

```

ANNEXES

```
ERASE df
DIM p2(5, 1)
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO donne
p2(i, 1) = p2(i, 1) + dft(i, j) * (y(j) - yde(j))
NEXT j
NEXT i
```

```
REM *****
REM INVERSE
REM *****
DIM pla(5, 10)
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
pla(i, j) = p1(i, j)
NEXT j
NEXT i
ERASE p1
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 6 TO 10
IF j = i + 5 THEN pla(i, j) = 1 ELSE pla(i, j) = 0
NEXT j
NEXT i
```

```
FOR k = 1 TO 5
FOR j = 10 TO k STEP -1
pla(k, j) = pla(k, j) / pla(k, k)
NEXT j
FOR j = 10 TO k STEP -1
FOR i = 1 TO 5
pla(i, j) = pla(i, j) - pla(i, k) * pla(k, j)
```

```
NEXT j
NEXT k
```

```
DIM inv(5, 5)
```

```
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
inv(i, j) = pla(i, j + 5)
NEXT j
NEXT i
ERASE pla
DIM r(5) AS DOUBLE
```

```
FOR i = 1 TO 5
FOR j = 1 TO 5
```

ANNEXES

```

r(i) = r(i) + inv(i, j) * p2(j, 1)
NEXT j
PRINT "r :"; i; ":"; r(i)
NEXT i
FOR i = 1 TO 5
a(i) = a(i) + r(i)
NEXT i
OPEN "o", #1, "c:\hsti2\parame12.dat"
WRITE #1, a(1), a(2), a(3), a(4), a(5)
CLOSE #1
z1 = 0
FOR i = 1 TO donne
z1 = z1 + (y(i) - yde(i)) ^ 2
NEXT i

ERASE yde
REDIM yde(donne) AS SINGLE
FOR i = 1 TO donne
yde(i) = 1 + (a(1) * x(i, 1) + a(2) * x(i, 1) ^ 2 + a(3) * x(i, 1) ^ 3) * (x(i, 2) ^ a(4)) * (x(i, 3) ^ a(5))
NEXT i

z2 = 0
FOR i = 1 TO donne
z2 = z2 + (y(i) - yde(i)) ^ 2
NEXT i

epsilon = ABS(z1 - z2) / z1
ERASE x, y, yde, dft, p2, r, inv
FOR i = 1 TO 5
PRINT "a : "; a(i)
NEXT i

PRINT z1, z2
PRINT "erreur :"; epsilon
LOOP UNTIL epsilon < .00001

DATA .32, .56, .82
DATA 4.56, 10.23, 15.84, 20.94, 27.9
DATA 0.0012, 0.000018
DATA .01, .15

```

END

ANNEXE A8

Graphes représentant les résultats des pertes de charge et de l'expansion du lit en fonction du flux gazeux

Les résultats sont représentés pour chaque série :

| Garnissage | Hauteur statique Hst : [mm] | % d'aire libre de la grille (φ) | Flux liquide (L) [Kg/m ² .s] | Séries |
|--|--------------------------------|---|---|--------|
| (I) $\rho_p(I) = 868 \text{ Kg/m}^3$ $d_p(I) = 10 \text{ mm}$ | 60 | 32 | 4,57 ; 10,23 ; 20,94 ; 15,84 ; et 27,90 | I |
| | | 56 | | II |
| | | 82 | | III |
| | 90 | 32 | | IV |
| | | 56 | | V |
| | | 82 | | VI |
| (II) $\rho_p(II) = 736 \text{ Kg/m}^3$ $d_p(II) = 15 \text{ mm}$ | 60 | 32 | | VII |
| | | 56 | | VIII |
| | | 82 | | IX |
| | 90 | 32 | | X |
| | | 56 | | XI |
| | | 82 | | XII |
| | 120 | 32 | | XIII |
| | | 56 | | XIV |
| | | 82 | | XV |

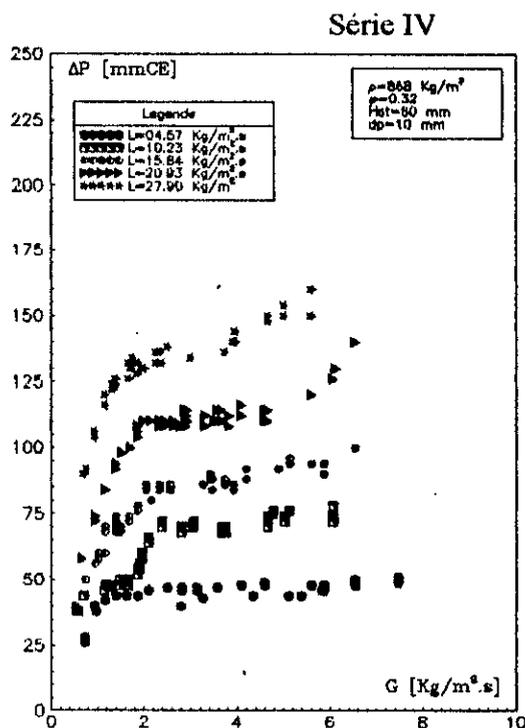
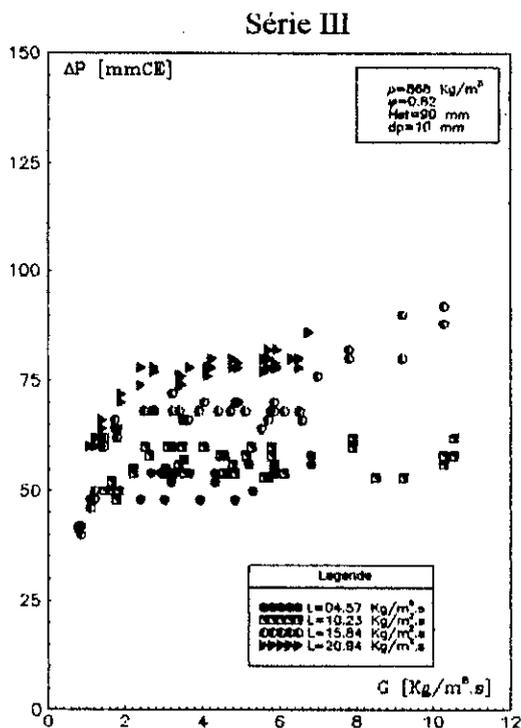
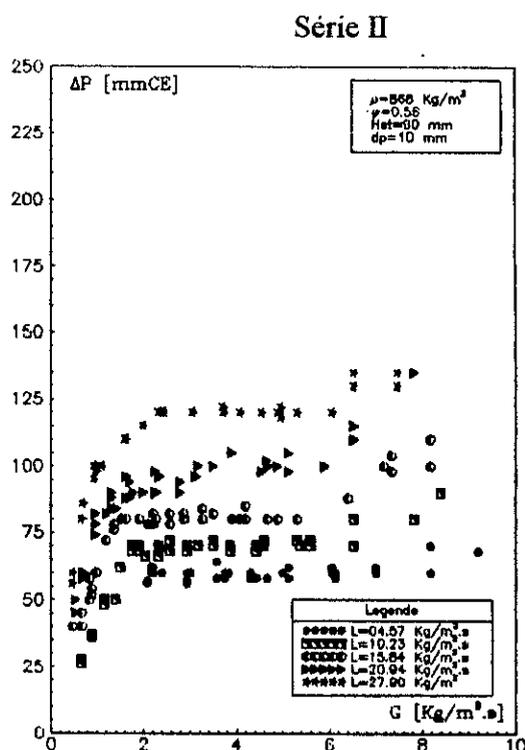
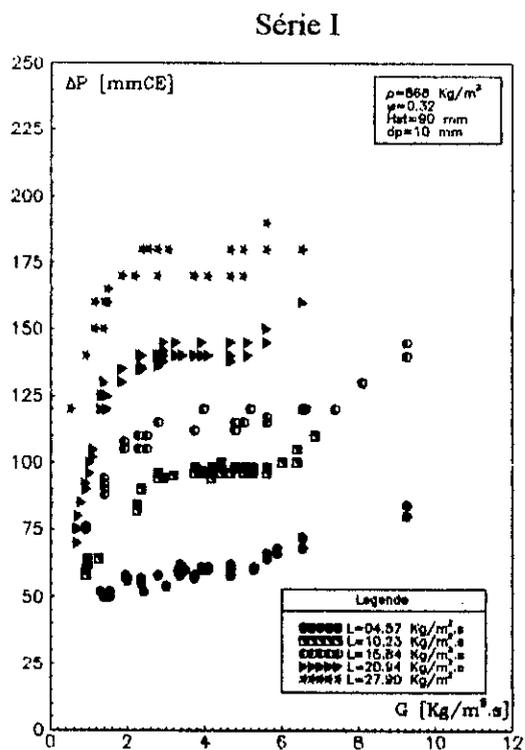


Figure A8. 1 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
(Séries I, II, III, IV)

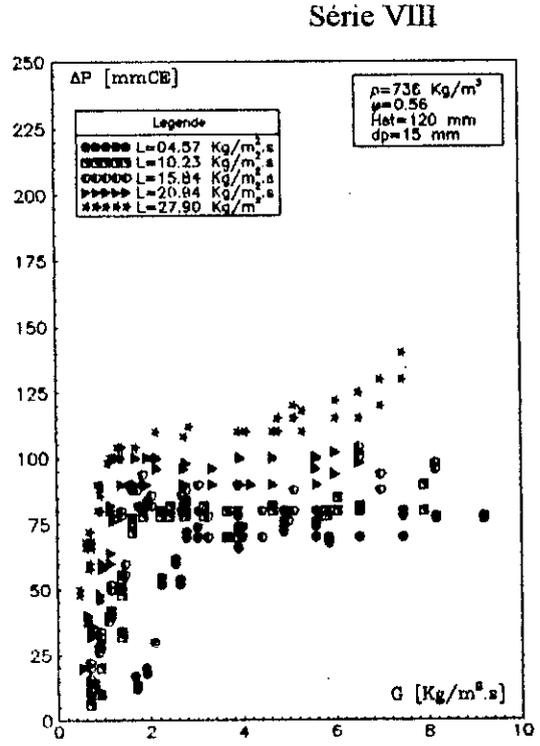
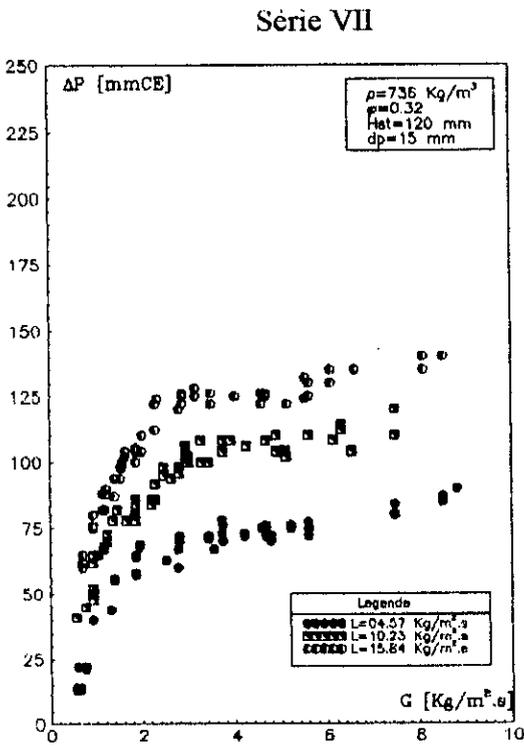
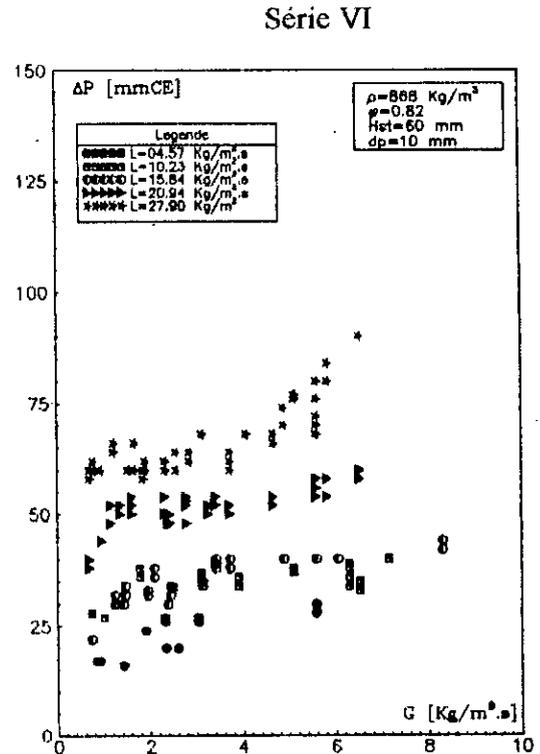
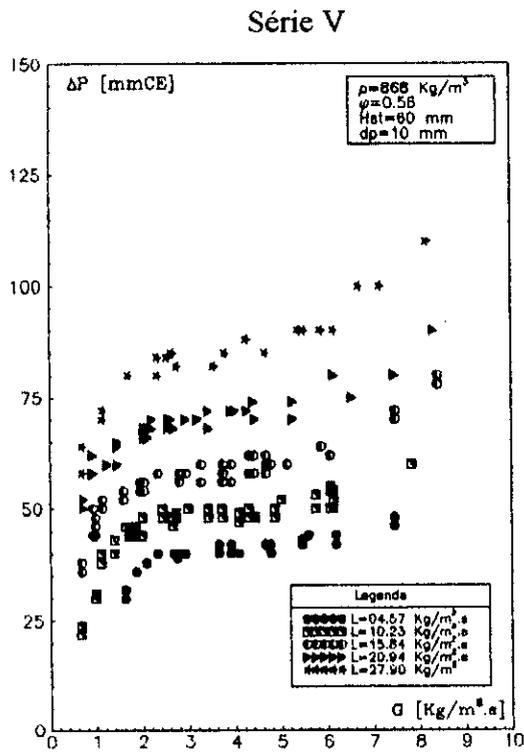
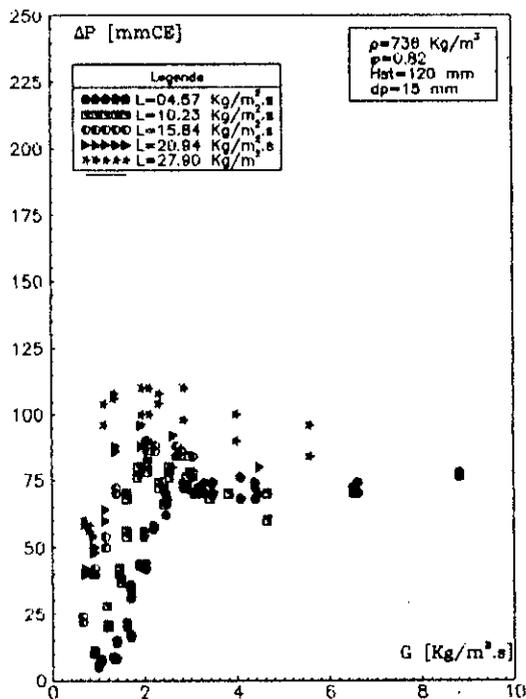
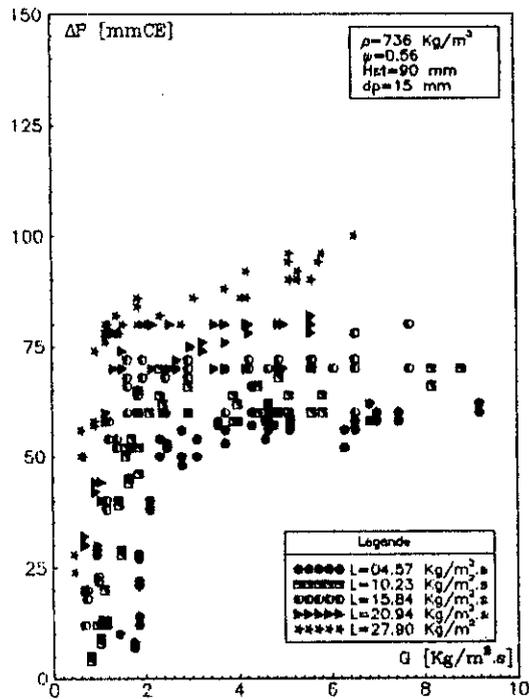


Figure A8. 2 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
(Séries V, VI, VII, VIII)

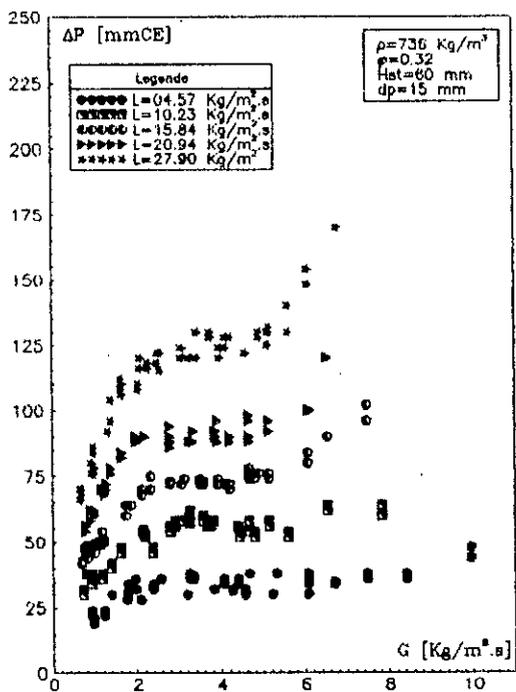
Série IX



Série XI



Série XIII



Série XIV

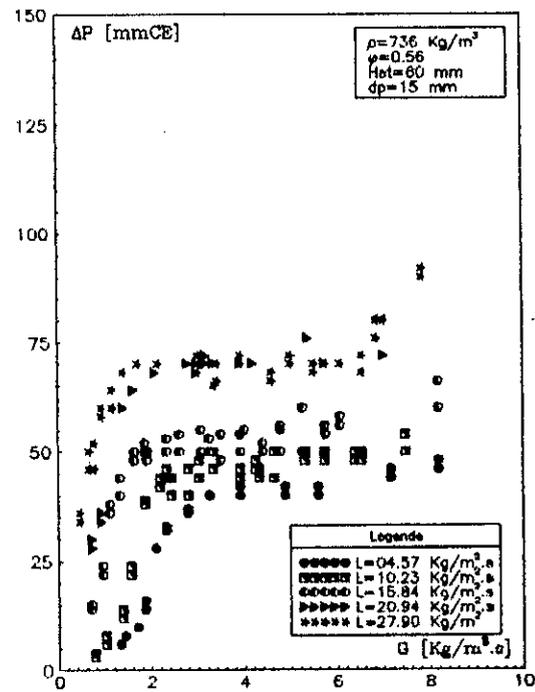


Figure A8.3 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
(Séries IX, XI, XIII, XIV)

Série XV

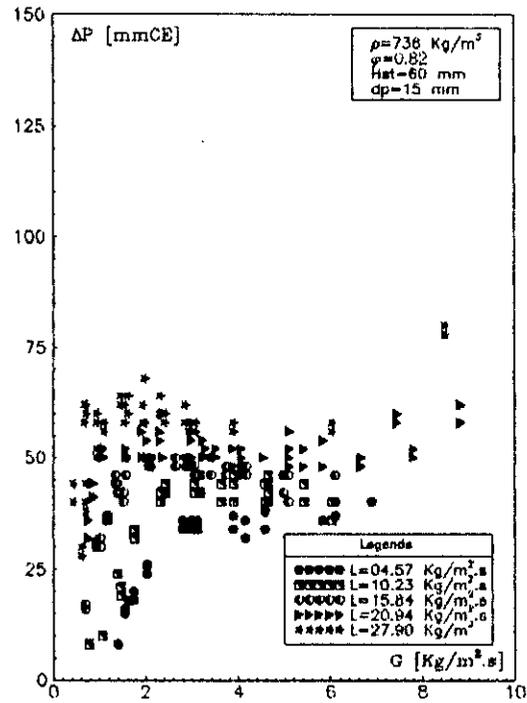


Figure A8. 4 : Evolution des pertes de charge avec le flux gazeux :
(Série XV)

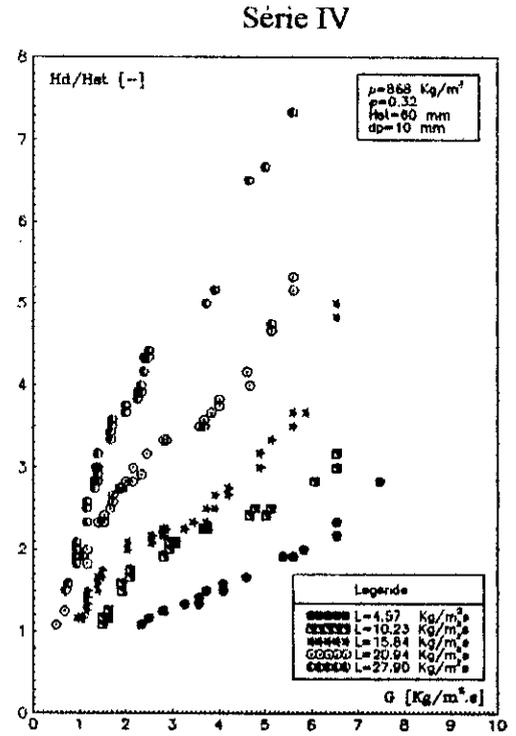
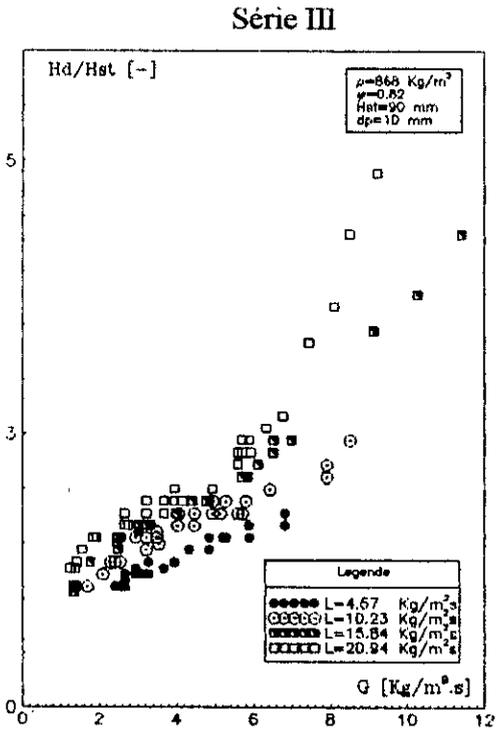
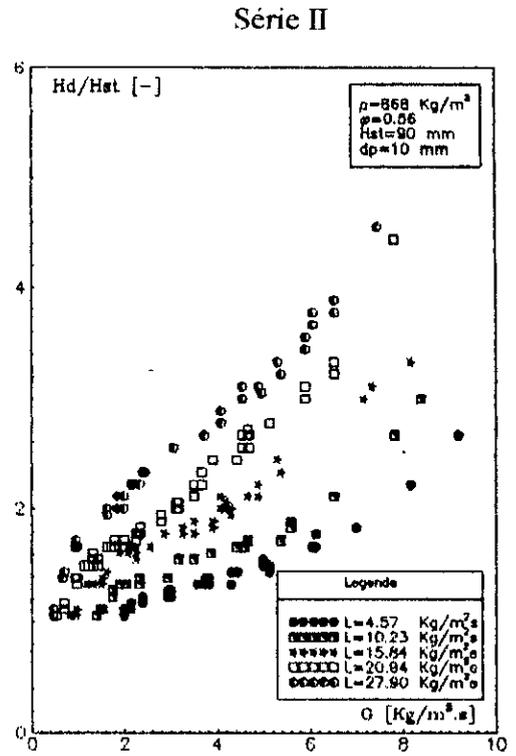
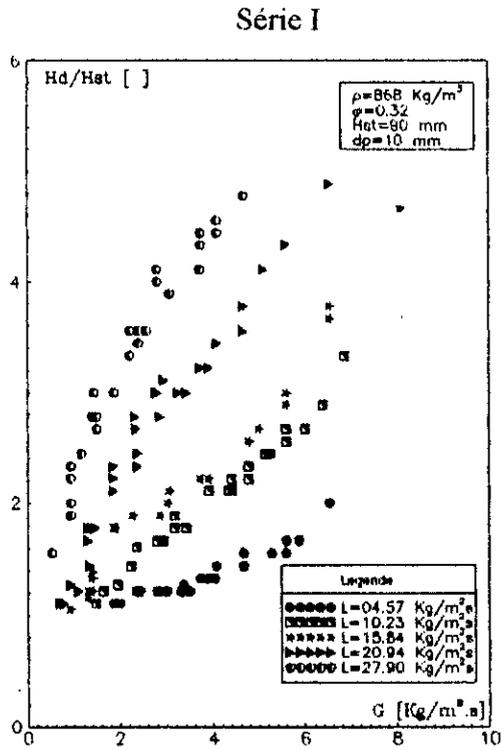


Figure A8. 5 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
(Series I, II, III, IV)

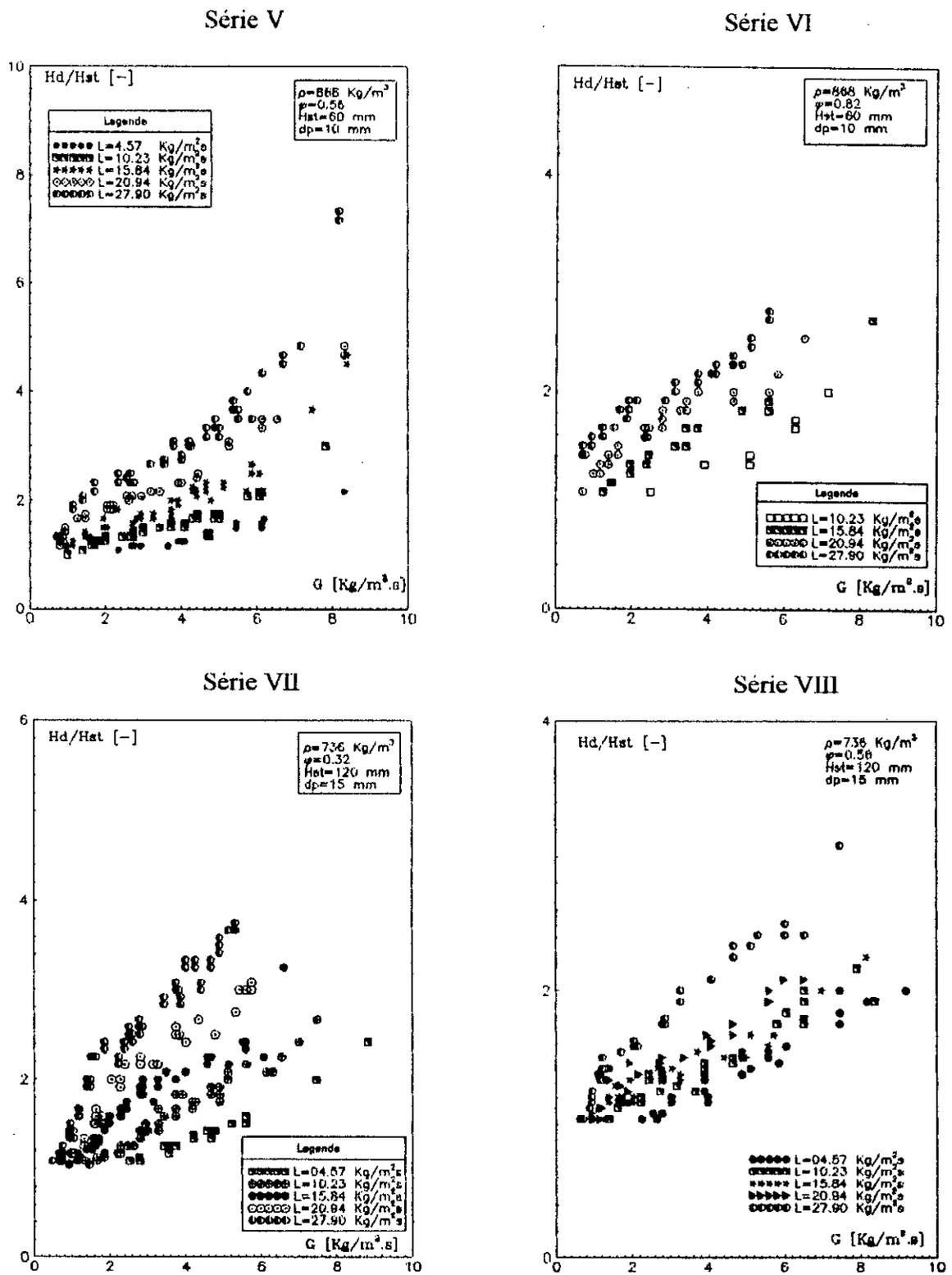
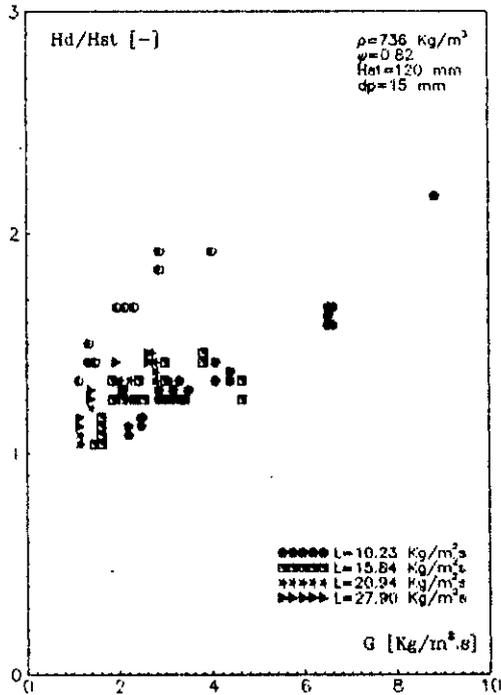
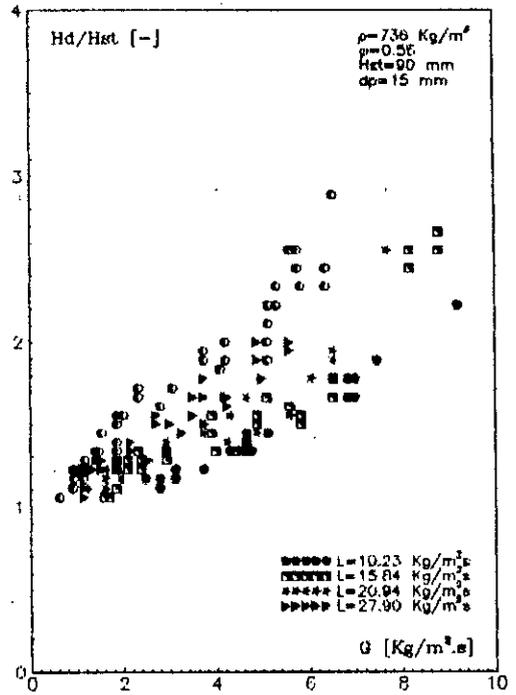


Figure A8. 6 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
(Séries V, VI, VII, VIII)

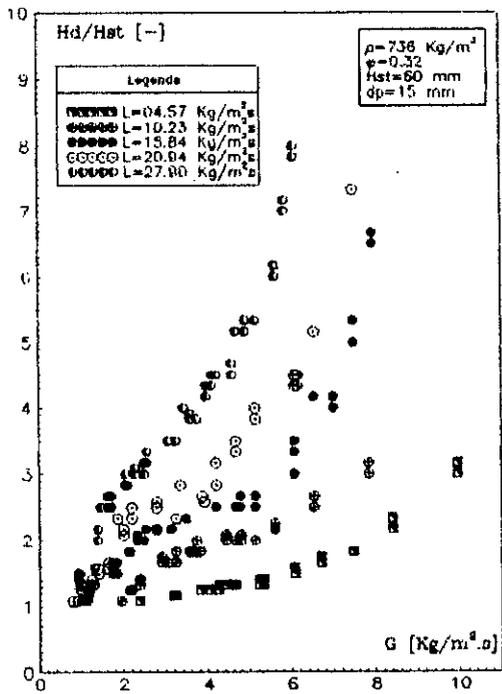
Série IX



Série XI



Série XIII



Série XIV

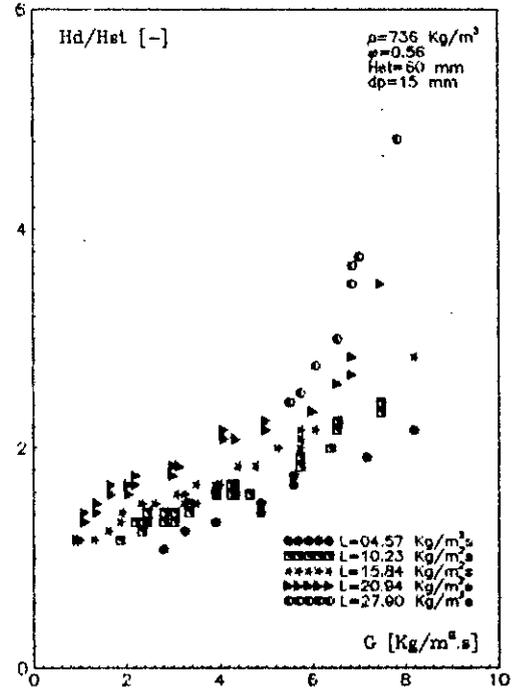


Figure A8. 7 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
(Séries IX, XI, XIII, XIV)

Série XV

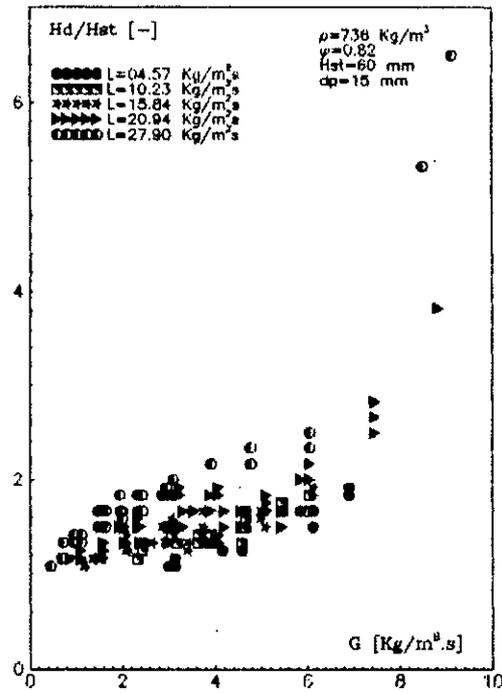


Figure A8. 8 : Evolution de l'expansion du lit avec le flux gazeux :
(Série XV)