

CEA - R - 3892

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

12.1

**STRUCTURE DES ECOULEMENTS
DIPHASIQUES EAU - AIR**

**ETUDE DE LA FRACTION DE VIDE MOYENNE
ET DES CONFIGURATIONS D'ECOULEMENT**

par

Robert ROUMY

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble

Rapport CEA - R - 3892

1969

Fa

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

C.E.N - SACLAY B.P. n°2, 91 - GIF-sur-YVETTE - France

CEA-R-3892 - ROUMY Robert

STRUCTURE DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES EAU-AIR
ETUDE DE LA FRACTION DE VIDE MOYENNE ET DES
CONFIGURATIONS D'ECOULEMENT

Sommaire. - Ce rapport est une étude expérimentale d'un mélange diphasique eau-air dans des tubes verticaux de différents diamètres. Nous avons mesuré la fraction de vide moyenne dans une portion de canal de longueur 2 m, au moyen d'un système de vannes à fermeture rapide et simultanée. Au moyen de sondes résistives et de photographies nous avons déterminé la configuration de l'écoulement et tracé des cartes donnant les frontières entre les différentes configurations d'écoulement : bulles indépendantes, bulles agglomérées, bouchons, semi-annulaire, annulaire. Nous montrons que pour les régimes à bulles et à bouchons, une équation

./.

CEA-R-3892 - ROUMY Robert

STRUCTURE OF TWO-PHASE AIR-WATER FLOWS STUDY
OF AVERAGE VOID FRACTION AND FLOW PATTERNS

Summary. - This report deals with experimental work on a two phase air-water mixture in vertical tubes of different diameters. The average void fraction was measured in a 2 metre long test section by means of quick-closing valves. Using resistive probes and photographic techniques, we have determined the flow patterns and developed diagrams to indicate the boundaries between the various patterns : independent bubbles, agglomerated bubbles, slugs, semi-annular, annular. In the case of bubble flow and slug flow, it is shown that the relationship between the average void fraction and the superficial velocities of the phases is given by :

./.

de la forme $V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) \cdot g(V_{sl})$ relie la fraction de vide moyenne aux vitesses superficielles de chacune des phases. Nous avons pu déterminer la fonction $g(V_{sl})$ dans le cas du régime à bulles indépendantes, et nous trouvons $g(V_{sl}) = V_{sl} + 20$. Pour les régimes semi-annulaire et annulaire, il semble qu'en première approximation, la fraction de vide moyenne ne dépende que du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$.

1969

63 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

$V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) \cdot g(V_{sl})$. The function $g(V_{sl})$ for the case of independant bubbles has been found to be : $g(V_{sl}) = V_{sl} + 20$. For semi-annular and annular flow conditions, it appears that the average void fraction depends, to a first approximation ; only on the ratio $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$.

1969

63 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

- Rapport CEA-R-3892 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble
Service des Transferts Thermiques

STRUCTURE DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES EAU-AIR

Etude de la fraction de vide moyenne
et des configurations d'écoulement

par

Robert ROUMY

- Décembre 1969 -

SOMMAIRE

- 0 INTRODUCTION
- 1 - VALEURS MOYENNES DANS UN ECOULEMENT DIPHASIQUE
 - 1.1 - Débits volumiques par unité de surface ou vitesses superficielles
 - 1.2 - Section de passage de chacune des phases, fraction de vide moyenne
 - 1.3 - Vitesse moyenne de chacune des phases
- 2 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL
 - 2.1 - Mélange des deux phases
 - 2.2 - Section d'essais - vannes à fermeture rapide et simultanée
- 3 - MESURES EFFECTUEES, DOMAINE D'ETUDE
 - 3.1 - Fraction de vide moyenne $\langle \alpha \rangle$
 - 3.2 - Perte de pression totale ΔP_{tot}
 - 3.3 - Débit d'eau et débit d'air
 - 3.4 - Domaine d'étude, configurations observées
- 4 - LES DIFFERENTS REGIMES D'ECOULEMENT
 - 4.1 - Régimes à bulles - Transition avec le régime à bouchons
 - 4.2 - Variations de la fraction de vide moyenne avec la cote lors du régime à bulles agglomérées
 - 4.3 - Régime à bouchons - Passage au régime semi-annulaire
 - 4.4 - Régime annulaire
 - 4.5 - Frontières entre les régimes d'écoulement
- 5 - RELATION ENTRE LES VITESSES SUPERFICIELLES ET LA FRACTION DE VIDE MOYENNE
 - 5.1 - Résultats antérieurs
 - 5.1.1 - Résultats de ARMAND et de BANKOFF
 - 5.1.2 - Résultats de BEHRINGER et de ZUBER
 - 5.2 - Variation de V_{sg} en fonction de $\langle \alpha \rangle$ à V_{sl} constant
 - 5.3 - Insuffisance du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$ pour la détermination de $\langle \alpha \rangle$
 - 5.4 - Variations de V_{sg} en fonction de V_{sl} à $\langle \alpha \rangle$ constant dans le cas du régime à bulles indépendantes

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 Schéma de montage.
- Fig. 2 a) Dispositif de mesure des débits.
b) Canal d'essais et vannes.
- Fig. 3 Schéma du mélangeur.
- Fig. 4 Erreur relative sur $\langle \alpha \rangle$: $\frac{\Delta \langle \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle}$ en fonction de $\langle \alpha \rangle$ - section d'essais de longueur 2 m.
- Fig. 5 Configurations d'écoulement.
- Fig. 6 Domaine d'étude.
- Fig. 7 Rapport $\frac{\Delta P_{tot}}{\Delta l \rho_l g}$ en fonction de la fraction de vide moyenne - $V_{sl} = 28,5$ cm/s.
- Fig. 8 Vitesse superficielle de la phase gazeuse en fonction de la fraction de vide moyenne dans des sections d'essais à différentes distances de l'entrée du canal. $V_{sl} = 18,3$ cm/s.
- Fig. 9.1 Frontières entre les régimes d'écoulement - diagramme $V_{sg} - V_{sl}$ - tube de diamètre 32 mm.
- Fig. 9.1 bis - Frontières entre les régimes d'écoulement - diagramme $V_{sg} - V_{sl}$ - tube de diamètre 32 mm. Fig. 9.1 agrandie au voisinage de l'origine.
- Fig. 9.2 Frontières entre les régimes d'écoulement - diagramme $V_{sg} - V_{sl}$ - tube de diamètre 20 mm.
- Fig. 9.3 Frontière entre les régimes d'écoulement - diagramme $V_{sg} - V_{sl}$ - tube de diamètre 16 mm.
- Fig. 10.1 Frontières entre les régimes à bulles et le régime à bouchons - diagramme $V_{sg} - \langle \alpha \rangle$ - tube de diamètre 32 mm.
- Fig. 10.2 Frontières entre les régimes à bulles et le régime à bouchons - diagramme $V_{sg} - \langle \alpha \rangle$ - tube de diamètre 20 mm.
- Fig. 10.3 Frontières entre les régimes à bulles et le régime à bouchons - diagramme $V_{sg} - \langle \alpha \rangle$ - tube de diamètre 16 mm.
- Fig. 11.1 Fraction de vide moyenne en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse - tube de diamètre 32 mm.
- Fig. 11.2 Fraction de vide moyenne en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse - tube de diamètre 20 mm.
- Fig. 11.3 Fraction de vide moyenne en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse - tube de diamètre 16 mm.

- Fig. 12.1 Rapport des vitesses superficielles en fonction de la fraction de vide moyenne - tube de diamètre 32 mm.
- Fig. 12.2 Rapport des vitesses superficielles en fonction de la fraction de vide moyenne - tube de diamètre 20 mm.
- Fig. 12.3 Rapport des vitesses superficielles en fonction de la fraction de vide moyenne - tube de diamètre 16 mm.
- Fig. 15 Vitesse superficielle de la phase gazeuse en fonction de la vitesse superficielle de la phase liquide à $\langle \alpha \rangle$ constant - tube de diamètre 32 mm.
- Fig. 13 bis Vitesse superficielle de la phase gazeuse en fonction de la vitesse superficielle de la phase liquide, à $\langle \alpha \rangle$ constant - tube de diamètre 32 mm, figure 13 agrandie au voisinage de l'origine.
- Fig. 14 Vitesse limite d'une bulle d'air dans de l'eau distillée ou filtrée, en fonction de sa taille.
- Fig. 15.1 Fraction de vide moyenne en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$ - tube de diamètre 32 mm - régime à bulles indépendantes.
- Fig. 15.2 Fraction de vide moyenne en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$ - tube de diamètre 20 mm - régime à bulles indépendantes.
- Fig. 15.3 Fraction de vide moyenne en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$ - tube de diamètre 16 mm - régime à bulles indépendantes.

NOMENCLATURE

- D : diamètre du canal.
- g : accélération de la pesanteur.
- M_g : débit massique de gaz.
- M_l : débit massique de liquide.
- Q_g : débit volumique de gaz.
- Q_l : débit volumique de liquide.
- n : distance entre les vannes.
- h' : hauteur d'eau dans la section d'essais après fermeture des vannes et décantation du mélange.
- p : pression statique au milieu de la section d'essais.
- S : section du canal.
- S_g : section de passage de la phase gazeuse.
- S_l : section de passage de la phase liquide.
- V_g : vitesse de la phase gazeuse en un point.
- V_l : vitesse de la phase liquide en un point.
- V_{sg} : vitesse superficielle de la phase gazeuse : $V_{sg} = \frac{Q_g}{S_g}$
- V_{sl} : vitesse superficielle de la phase liquide : $V_{sl} = \frac{Q_l}{S_l}$
- $\langle V_g \rangle$: vitesse moyenne de la phase gazeuse $\langle V_g \rangle = \frac{Q_g}{S_g}$
- $\langle V_l \rangle$: vitesse moyenne de la phase liquide $\langle V_l \rangle = \frac{Q_l}{S_l}$
- v : vitesse relative en un point $v = V_g - V_l$
- v_T : vitesse limite de montée d'une bulle en milieu infini immobile.
- $\langle \alpha \rangle$: fraction de vide moyenne dans la section d'essais.
- σ_l : tension superficielle de la phase liquide.
- ρ_g : masse spécifique de la phase gazeuse.
- ρ_l : masse spécifique de la phase liquide.
- $\Delta\rho$: différence des masses spécifiques : $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g$.
- Δl : distance entre les deux prises de pression.
- ΔP_{tot} : perte de pression totale sur la longueur Δl

ΔP_1 : perte de pression par frottement en liquide seul.

Indices :

g : gaz

l : liquide

STRUCTURE DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES EAU-AIR

ETUDE DE LA FRACTION DE VIDE MOYENNE ET DES CONFIGURATIONS D'ECOULEMENT

0 - INTRODUCTION

Cette étude est surtout axée sur les valeurs moyennes dans les écoulements diphasiques. Les valeurs moyennes n'apportent pas, bien sûr, de renseignements directs sur la structure fine de l'écoulement, mais elles permettent d'obtenir des relations globales qui résultent de l'intégration des relations locales. Grâce à la connaissance des vitesses moyennes, il est possible par exemple de mettre en évidence un glissement global.

Bien que l'existence de différentes configurations d'écoulement soit connue depuis longtemps, beaucoup d'auteurs extrapolent les résultats obtenus lors d'une configuration, à une autre configuration, sans tenir compte du changement même de configuration. Nous pensons que, pour cerner les phénomènes d'un peu plus près, il faille d'abord établir des cartes de régime d'écoulement, rechercher des lois particulières pour chaque régime, et voir seulement ensuite s'il est possible de dégager une loi générale.

1 - VALEURS MOYENNES DANS UN ECOULEMENT DIPHASIQUE

Les définitions des valeurs moyennes sont tirées du cours de KUTATELADZE [6].

1.1 - Débits volumiques par unité de surface ou vitesses superficielles ou densité de flux volumique

Considérons une section du canal de surface S perpendiculaire au sens de l'écoulement. A un instant t donné, existent dans cette section n domaines occupés par la phase liquide. Soient $S_{11} \dots S_{12} \dots S_{1n}$, les surfaces de chacun de ces n domaines.

En un point de l'un de ces domaines la vitesse de la phase liquide est V_1 . De même existent m domaines de surface $S_{g1} \dots S_{g2} \dots S_{gn}$ occupés par la phase gazeuse, et la vitesse de la phase gazeuse en un point de l'un de ces domaines est

Par définition le débit de la phase liquide à l'instant est :

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n \int_{S_{1i}} v_1 ds$$

et le débit de la phase gazeuse est :

$$Q_g = \sum_{j=1}^m \int_{S_{gj}} v_g ds$$



La vitesse superficielle de la phase liquide est :

$$V_{sl} = \frac{Q_l}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{S_{li}} V_l ds}{S}$$

La vitesse superficielle de la phase gazeuse est :

$$V_{sg} = \frac{Q_g}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{S_{gj}} V_g ds}{S}$$

1.2 - Section de passage de chacune des phases, fraction de vide moyenne

A l'instant t la section occupée par la phase liquide est :

$$S_l = \sum_{i=1}^n S_{li}$$

De même la section occupée par la phase gazeuse est :

$$S_g = \sum_{j=1}^n S_{gj}$$

Les sections S_l et S_g sont telles que :

$$S = S_l + S_g$$

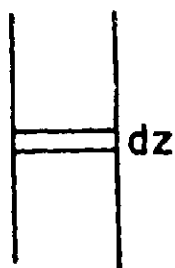
Nous désignons par fraction de vide moyenne le rapport :

$$\langle \alpha \rangle = \frac{S_g}{S}$$

Nous voyons que :

$$S_g = \langle \alpha \rangle S$$

$$\text{et } S_l = (1 - \langle \alpha \rangle) S$$



Masse spécifique moyenne du mélange dans une tranche d'épaisseur dz

Pour dz suffisamment petit, nous pouvons supposer que

S_g , S_l et ρ_g sont constants.

Le volume de la tranche est :

$$dv = S dz$$

La masse spécifique moyenne du mélange est :

$$\rho_m = \frac{\langle \alpha \rangle S dz \rho_g + (1 - \langle \alpha \rangle) S dz \rho_l}{S dz}$$

$$\rho_m = \langle \alpha \rangle \rho_g + (1 - \langle \alpha \rangle) \rho_l$$

Dans le cas du mélange eau-air, ρ_g est petit devant ρ_l . On a donc :

$$\rho_m = (1 - \langle \alpha \rangle) \rho_l$$

1.3 - Vitesse moyenne de chacune des phases

Nous désignons par vitesse moyenne de la phase liquide le rapport :

$$\langle V_l \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{S_{li}} v_l ds}{\sum_{i=1}^n S_{li}}$$

$$\langle V_l \rangle = \frac{Q_l}{1 - \langle \alpha \rangle S}$$

C'est la vitesse moyenne qu'aurait la phase liquide dans un canal de section S_l pour assurer un débit Q_l .

De même, nous désignons par vitesse moyenne de la phase gazeuse le rapport :

$$\langle V_g \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{S_{gj}} v_g ds}{\sum_{i=1}^n S_{gj}}$$

$$\langle V_g \rangle = \frac{Q_g}{\langle \alpha \rangle S}$$

C'est la vitesse moyenne qu'aurait la phase gazeuse dans un canal de section S_g , pour assurer un débit Q_g . Pour le régime à bulles c'est aussi la vitesse moyenne de montée des bulles.

2 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL - Fig. 1 et 2

Les fluides utilisés sont : l'eau industrielle du laboratoire et de l'air provenant d'un container d'air comprimé à 150 kg/cm^2 , détendu à une pression voisine de la pression atmosphérique. L'installation se compose de dispositifs de mesure des débits d'eau et d'air, d'un mélangeur et d'un canal vertical transparent en polymétacrylate de méthyle (plexiglas). Des canaux de diamètre 32 mm, 20 mm, 16 mm ont été utilisés. Après passage dans le canal, le mélange se verse dans un récipient ouvert à la pression atmosphérique.

Les dispositifs de mesure de débits (fig. 2a) sont constitués par des débitmètres à flotteurs.

2.1 - Mélange des deux phases

Le mélangeur placé à la base du canal est représenté en coupe sur la figure 3.

L'air arrive par 4 orifices dans une chambre annulaire de hauteur 5 cm dont les parois sont distantes de 2 cm. L'injection de l'air dans l'eau se fait par la paroi interne qui est un tube dont l'axe coïncide avec celui du canal. Lors des essais sur les canaux de diamètres 32 mm et 20 mm, nous avons utilisé un tube en bronze poreux de diamètre extérieur 30 mm et de diamètre de pores 12μ . La jonction avec le canal d'essais se faisait suivant le cas au moyen d'un divergent ou d'un convergent. L'expérience nous a montré que le diamètre des pores avait une influence très faible sur la taille des bulles. En effet, C. LACKME [7] qui utilisait des trous d'injection de diamètre 0,5 mm a obtenu dans un canal de diamètre extérieur 32 mm des bulles de la même taille que celles que nous avons obtenues dans le même canal par injection au moyen d'un tube en bronze poreux. Lors de nos

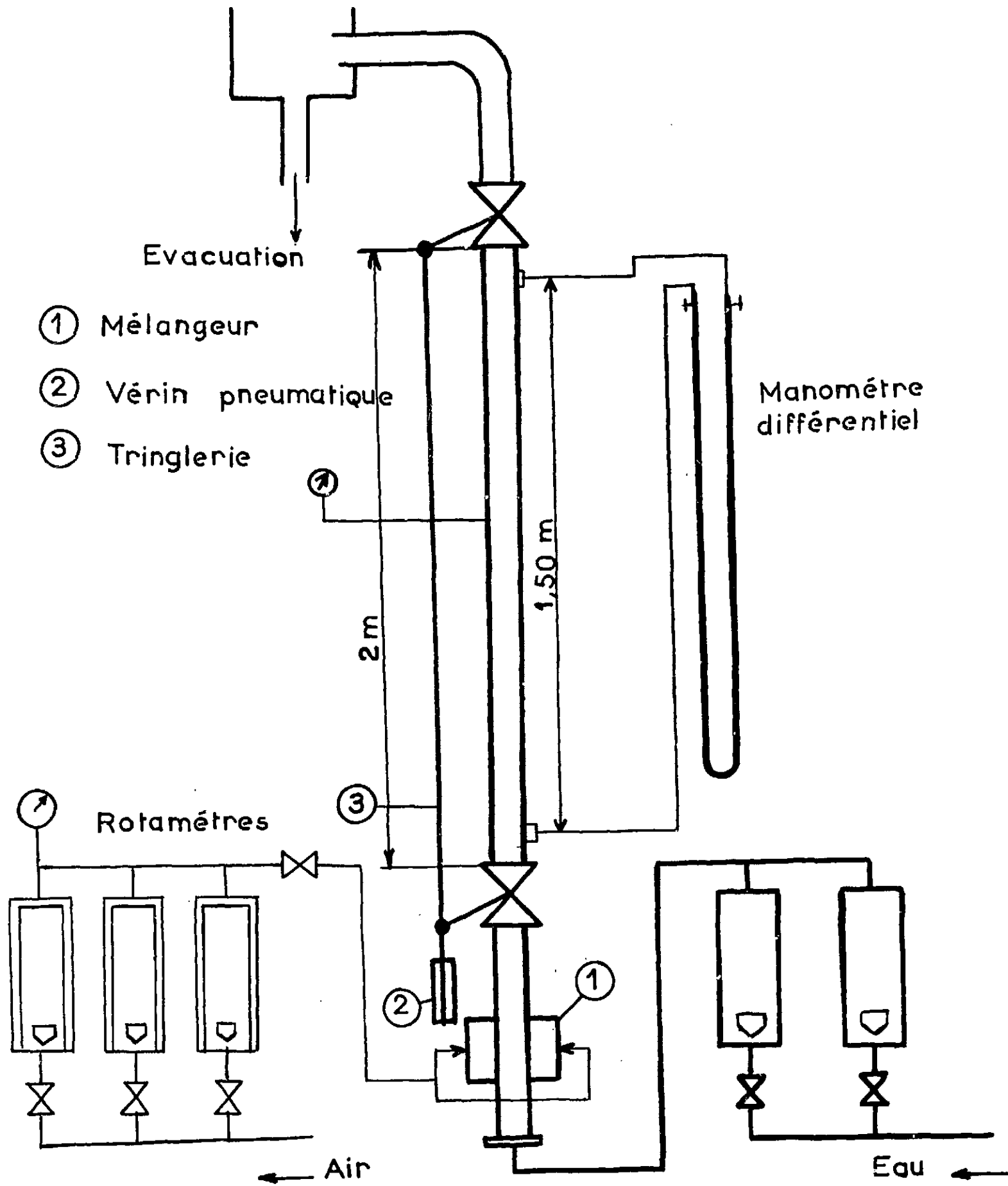
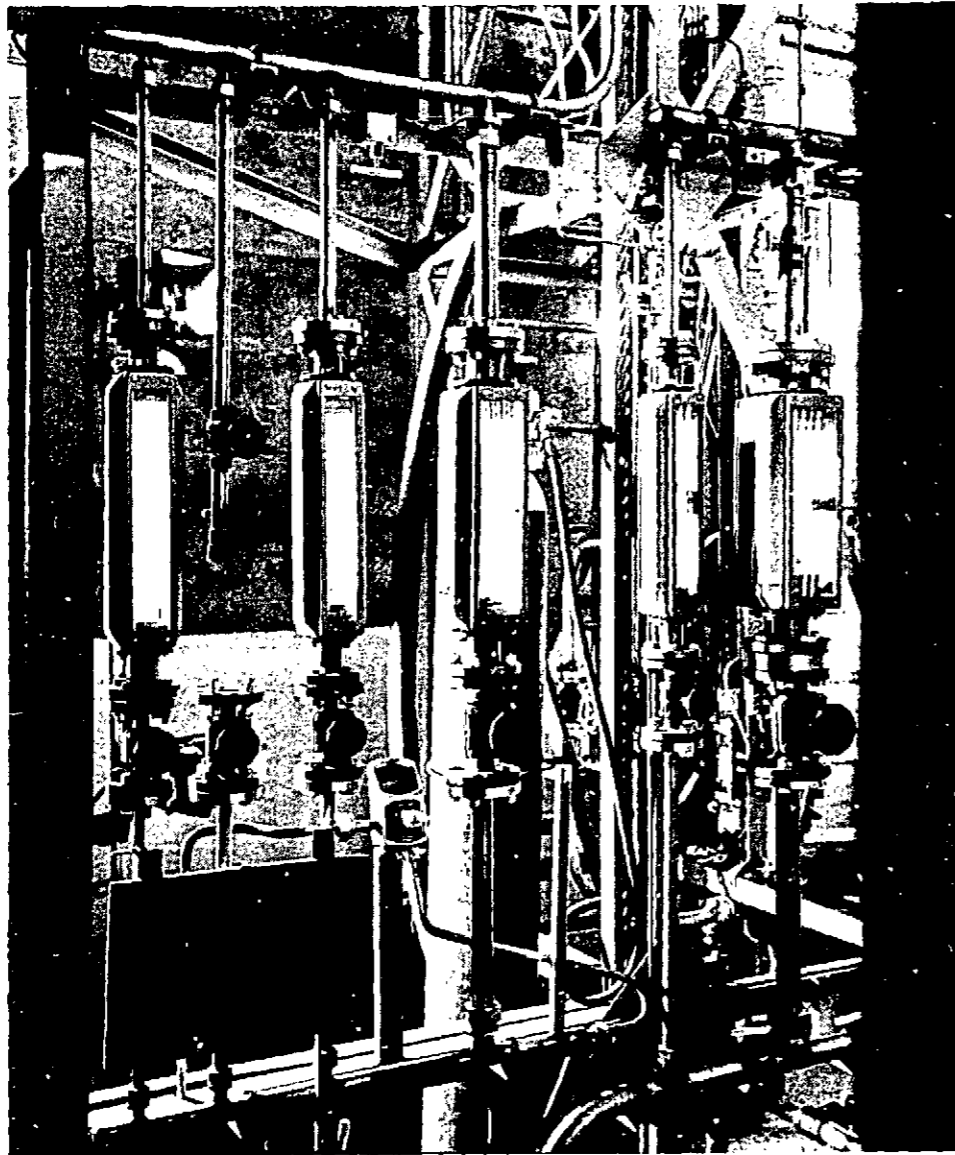
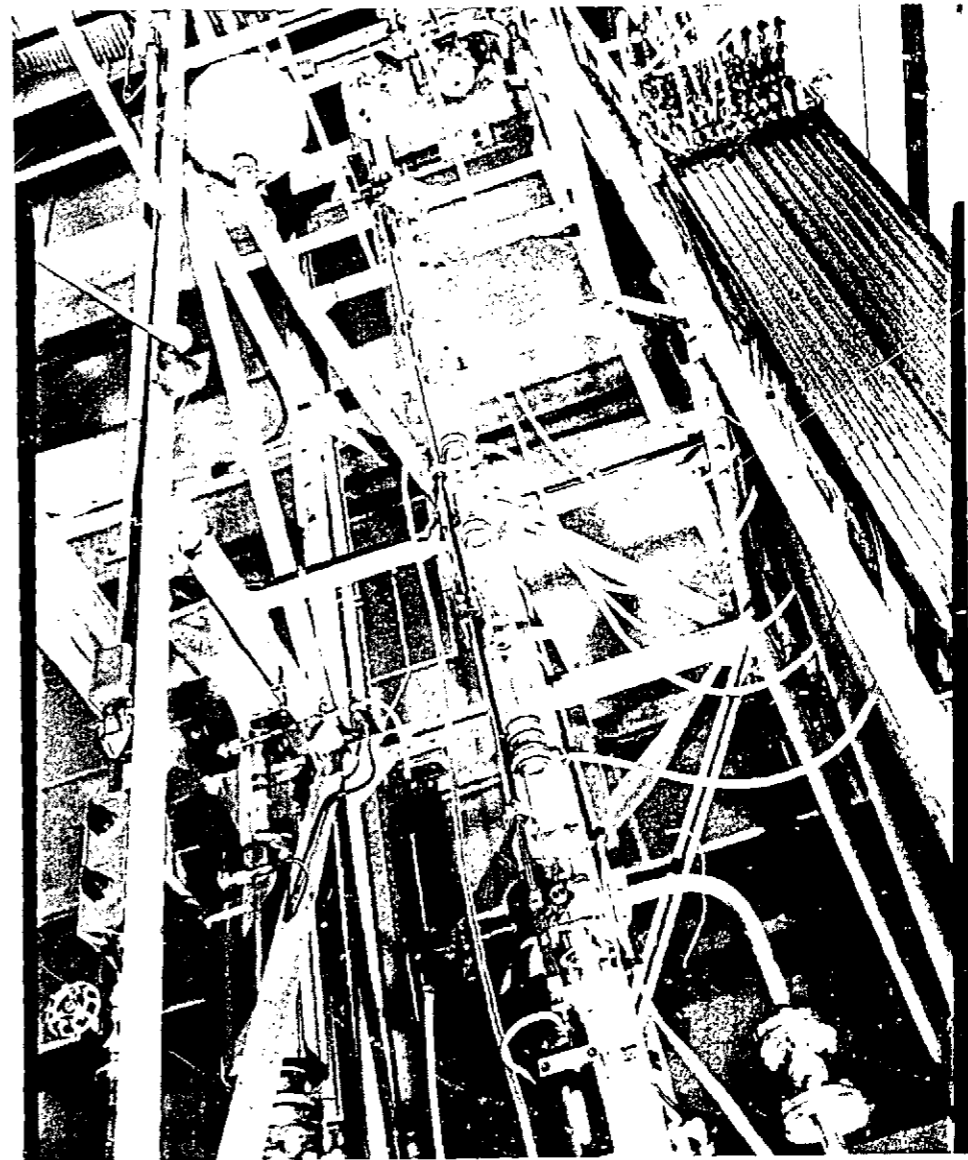


Figure n° 1 - Schéma de montage



2a - Dispositif de mesure des débits



2b - Canal d'essais et vannes

Figure n° 2

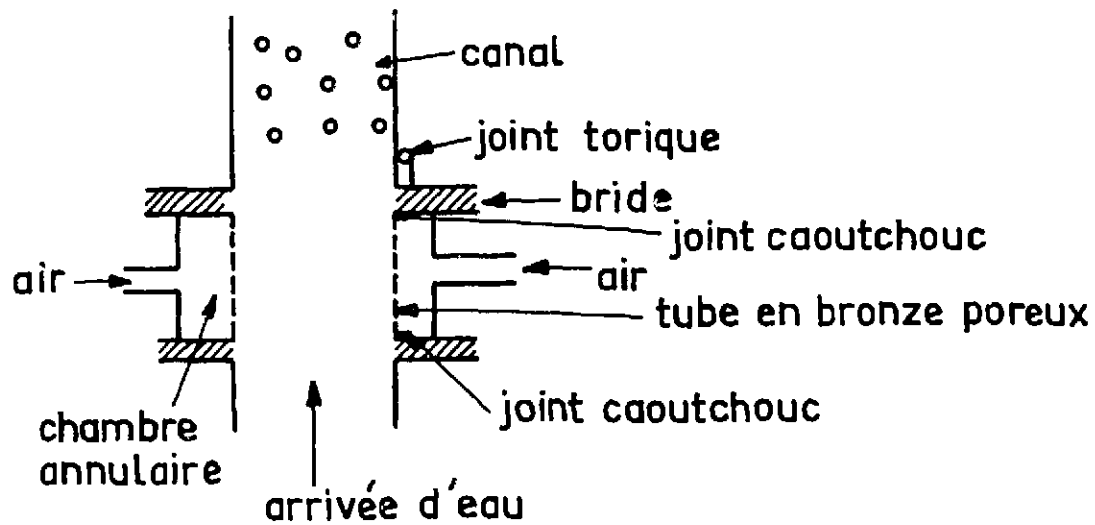


Figure 3

Schéma du mélangeur.

essais sur un canal de diamètre 16 mm, nous avons préféré utiliser un cylindre de diamètre intérieur 16 mm, percé de trous de diamètre 0,5 mm, plutôt qu'un cylindre en bronze poreux de diamètre intérieur 30 mm avec convergent (des cylindres en bronze poreux de diamètre intérieur 16 mm ne se trouvent pas dans le commerce).

2.2 - Section d'essais - Vannes à fermeture rapide et simultanée - Fig. 2 b.

Le canal en plexiglas est formé de 3 tronçons superposés, reliés par deux vannes à passage direct, constituées par des robinets à boule. Le tronçon central constitue la section d'essais. L'entrée de la section d'essais se trouve à 50 cm du mélangeur, ce qui à notre avis permet à l'écoulement de se stabiliser. Le diamètre de la section de passage des vannes est rigoureusement égal au diamètre du tube utilisé, ceci afin d'éviter toute discontinuité lors du passage dans les vannes, ce qui pourrait perturber l'écoulement. La fermeture des deux vannes est synchronisée au moyen du dispositif suivant, qu'on peut voir sur la figure 2 b : une tige métallique, mue par un vérin pneumatique, enclenche au même instant deux fourchettes qui font pivoter les boules fermant les vannes. Nous avons mesuré le temps de fermeture des vannes qui est de l'ordre de $\frac{4}{100}$ de seconde, et le décalage entre le début de fermeture de la première vanne et de la seconde qui est de $\frac{5}{1000}$ de seconde.

La section d'essais comporte en outre des dispositifs permettant de placer des sondes dans l'écoulement. La première sonde est placée à 50 cm de l'entrée de la section d'essais, et la seconde à 50 cm de la sortie. Ces sondes sont celles mises au point par C. LACKME [7].

Des photographies de l'écoulement ont été prises dans une section de hauteur 12 cm. Le milieu de cette section se trouve environ à 30 cm de l'entrée de la section d'essais. Une boîte parallélépipédique remplie de glycérine, dont l'indice est voisin de celui du plexiglas, permet d'éviter les effets de dioptré sphérique. Par ce procédé, on peut voir notamment si des bulles se trouvent sur la paroi du tube.

3 - MESURES EFFECTUEES ET DOMAINE D'ETUDE

3.1 - Fraction de vide moyenne $\langle \alpha \rangle$

La fermeture rapide et simultanée des deux vannes permet à un instant t de piéger un volume connu de mélange.

Soit S la section du canal, h la distance entre les deux vannes. Après fermeture des vannes et décantation du mélange la hauteur d'eau dans la section d'essais est h' :

$$(1 - \langle \alpha \rangle) Sh' + \langle \alpha \rangle S (h - h') = Sh$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{h - h'}{h}$$

Il est possible d'utiliser des sections d'essais de différentes longueurs, et même, au moyen de 3 vannes synchronisées, on peut mesurer la fraction de vide moyenne dans deux sections d'essais superposées.

Erreur sur $\langle \alpha \rangle$

$$\frac{\Delta \langle \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\Delta (h - h')}{h - h'} + \frac{\Delta h}{h}$$

La longueur h peut être fixée avec suffisamment de précision pour que l'erreur $\frac{\Delta h}{h}$ soit négligeable devant l'erreur $\frac{\Delta (h - h')}{h - h'}$

$$\Delta \langle \alpha \rangle = \frac{\Delta (h - h')}{h}$$

L'erreur $\Delta (h - h')$ provient de l'erreur de lecture sur h' , qui est la même quel que soit h' .

Si nous estimons que la lecture de h' se fait à ± 2 mm.

$$\Delta \langle \alpha \rangle = \pm \frac{2}{h}$$

Lors de nos premières expériences sur un tube de diamètre 20 mm, nous avons utilisé des sections d'essais de longueur 1 m, ce qui donne une erreur :

$$\Delta \langle \alpha \rangle = \pm \frac{2}{1000}$$

Pour des valeurs de $\langle \alpha \rangle$ de l'ordre de 0,01 l'erreur relative $\frac{\Delta \langle \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle}$ était donc $\pm \frac{2}{10}$. Nous avons ensuite préféré utiliser des sections d'essais de longueur 2 m qui permettent une meilleure approximation de $\langle \alpha \rangle$.

$$\Delta \langle \alpha \rangle = \pm \frac{1}{1000}$$

Sur la figure 4 nous avons représenté les variations de l'erreur relative $\frac{\Delta \langle \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle}$ en fonction de $\langle \alpha \rangle$, pour une section d'essais de longueur 2 m.

3.2 - Perte de pression totale ΔP_{tot}

La perte de pression totale dans les sections d'essais de longueur 2 m est mesurée entre deux prises de pression distantes de $\Delta l = 1,50$ m, situées à 25 cm de chacune des vannes.

La perte de pression totale entre les extrémités du canal étant $\Delta P'_{tot}$, nous admettons que :

$$\frac{\Delta P'_{tot}}{h} = \frac{\Delta P_{tot}}{\Delta l}$$

3.3 - Débit d'eau et débit d'air

Les débits sont mesurés au moyen de débitmètres à flotteur (rotamètre).

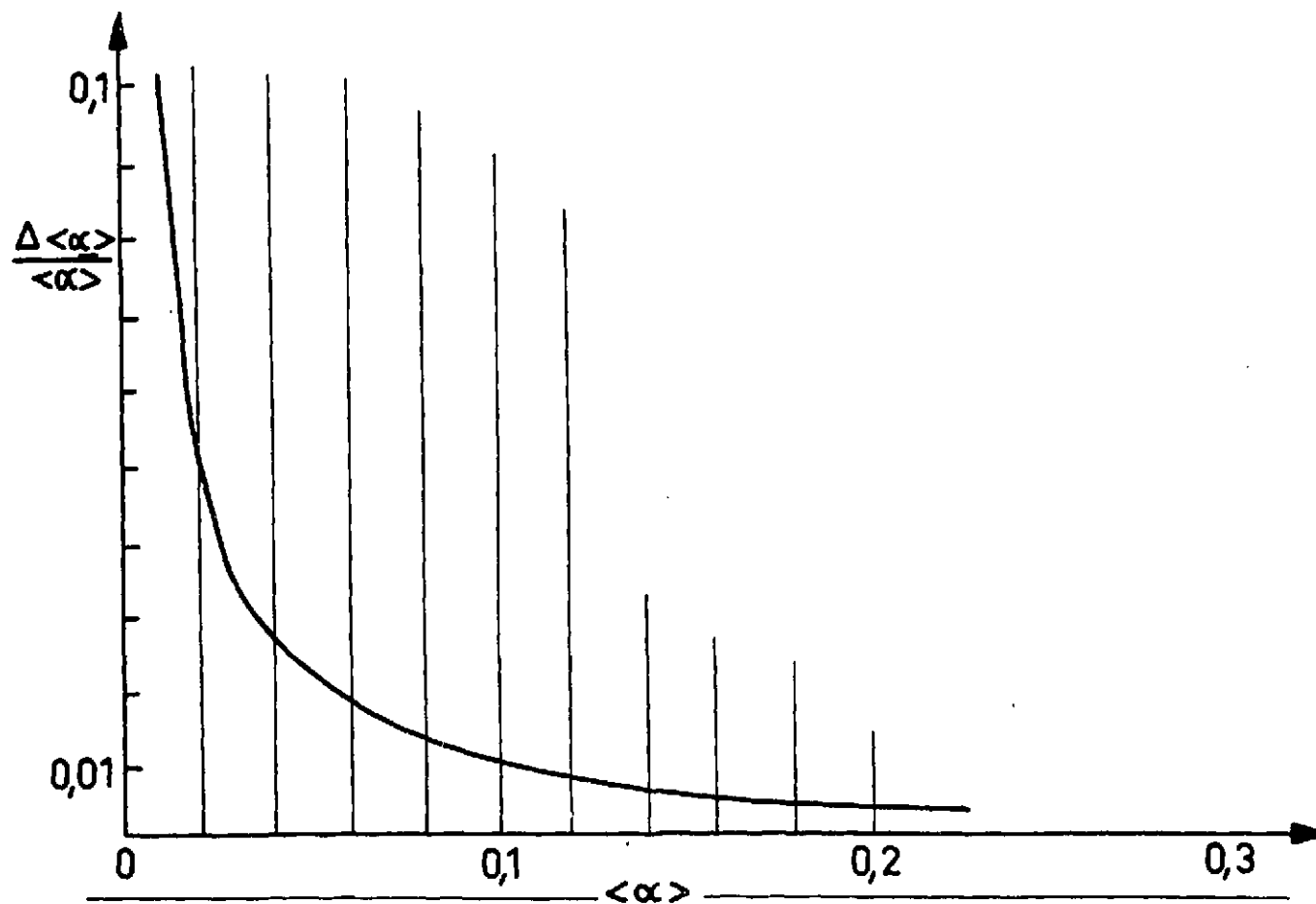


Figure 4 - Erreur relative sur $\langle\alpha\rangle$. $\frac{\Delta\langle\alpha\rangle}{\langle\alpha\rangle}$ en fonction de $\langle\alpha\rangle$
section d'essais de longueur 2 m.

Une prise de pression permet de mesurer la pression p au milieu du canal. Le débit d'air considéré est celui au milieu du canal. Nous admettons que l'air est à la pression p et à la température θ de l'eau. Plusieurs mesures de température de l'eau en cours d'expériences nous ont montré qu'au cours d'une expérience nous pouvions considérer θ comme une constante.

3.4 - Domaine d'étude, configurations observées

Pour les trois tubes, de diamètre 32 mm, 20 mm et 16 mm, nous avons fait varier la vitesse superficielle de l'eau de 0 (eau morte) à 4 m/s, et la vitesse superficielle de l'air de 0,4 cm/s à 3 m/s. Les expériences se sont déroulées de la manière suivante : nous avons fixé une vitesse superficielle de l'eau et fait croître la vitesse superficielle de l'air de valeurs donnant des fractions de vide de l'ordre de 0,020, jusqu'à la vitesse maximum que nous puissions atteindre. Nous avons mesuré pour chaque vitesse superficielle de l'air la fraction de vide, au moyen des vannes et noté la perte de pression totale. Par ce moyen, nous avons pu faire croître la fraction de vide de 0,020 à 0,750 pour des vitesses superficielles de l'eau allant de 0 à 50 cm/s. Pour des vitesses superficielles de l'eau plus grandes, le dispositif expérimental ne nous a pas permis d'atteindre des fractions de vide aussi grandes. Notamment pour des vitesses superficielles de l'eau de l'ordre de 5 m/s nous n'avons pas atteint de fractions de vide supérieures à 0,250. Pour chaque point, nous avons pris une photographie de l'écoulement. Les photographies sont prises au $\frac{1}{30000}$ de seconde.

L'éclair de $\frac{1}{30000}$ de seconde est fourni par un stroboscope synchronisé avec le déclencheur de l'appareil photographique. Nous avons également enregistré les signaux des sondes au moyen d'un enregistreur BAUDOIN.

A vitesses superficielles de l'eau donnée, et à vitesses superficielles de l'air croissantes, nous avons observé les configurations suivantes représentées sur la figure 5 : bulles, bouchons, semi-annulaire et annulaire. Nous avons divisé le régime à bulles en régime à "bulles indépendantes" dans lequel il semble qu'il n'y ait pas interaction entre bulles, et régime à "bulles agglomérées" dans lequel les bulles se touchent et réagissent les unes sur les autres. Le régime annulaire n'a pu être observé que pour des vitesses superficielles de l'eau inférieures à 1 m/s. Pour les vitesses superficielles de l'eau supérieures à 4 m/s nous n'avons pas dépassé le régime à bulles. Sur la figure 6 nous avons représenté les points expérimentaux dans le diagramme $\log V_{sg}$, $\log V_{sl}$. Sur cette figure nous avons également indiqué sommairement entre quels points s'effectuaient les changements de configurations : bulles, bouchons ; bouchons, semi-annulaire ; semi-annulaire, annulaire.

Nous étudions plus en détail ces frontières dans le paragraphe suivant.

4 - LES DIFFERENTS REGIMES D'ECOULEMENT

La détermination du régime d'écoulement est faite au moyen de sondes et au moyen de photographies. Nous avons utilisé simultanément ces deux moyens afin d'avoir plus de certitude sur le type d'écoulement. Si aux faibles vitesses superficielles de la phase liquide la détermination du type d'écoulement est assez aisée (les résultats donnés par les sondes et les photographies se recoupent très bien), elle devient malheureusement beaucoup plus difficile lorsque la vitesse superficielle de la phase liquide est supérieure à 2 m/s. Aux faibles fractions de vide les sondes donnent des signaux de bulles mais de très faible amplitude, et effectivement, sur les photographies, on voit des bulles très petites ; il semble que les bouchons disparaissent pour faire place à un mélange homogène (qui correspondrait peut-être au régime désigné par "churn" dans la littérature américaine). Nos études étant surtout axées sur les régimes à bulles et bouchons, nous n'avons pas cherché à étudier en détail ce type d'écoulement, ni à voir sa frontière avec le régime semi-annulaire.

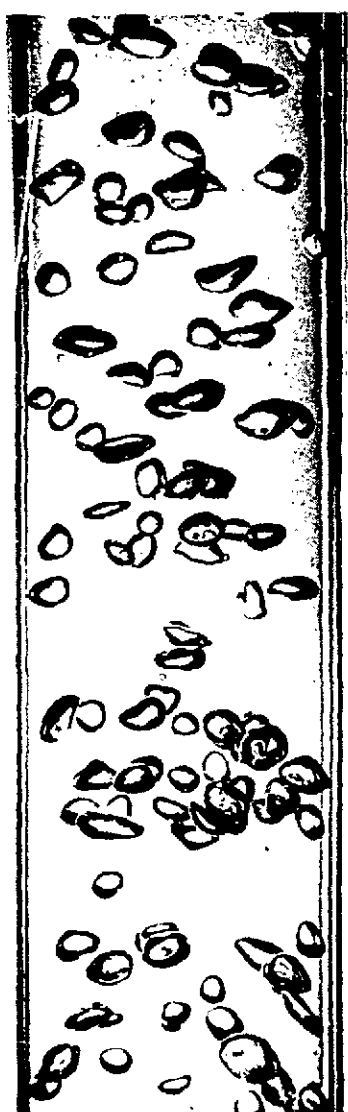
4.1 - Régimes à bulles - transition avec le régime à bouchons

Les deux sondes placées, l'une au voisinage de l'entrée de la section d'essais, l'autre au voisinage de la sortie, permettent de voir si la configuration de l'écoulement change le long du tube.

Lorsque, à débit d'eau donné, nous faisons croître le débit d'air, à partir de valeurs très faibles, nous obtenons d'abord des bulles assez éloignées les unes des autres. On peut voir de telles bulles sur la première photographie de la figure 5. L'intervalle de temps entre deux signaux de sonde est grand devant le temps pendant lequel la phase gazeuse est en contact avec la sonde. A ce régime, nous donnons le nom de régime à bulles indépendantes. Il semble, en effet, que dans ce cas les bulles soient suffisamment éloignées pour ne pas réagir les unes sur les autres.

Cette configuration reste la même sur toute la longueur de la section d'essais. Les signaux des deux sondes sont identiques. A mesure que l'on fait croître le débit d'air, la population de bulles augmente. Elles se rapprochent de plus en plus et finissent par se toucher. Nous obtenons alors la configuration représentée sur la deuxième photographie de la figure 5.

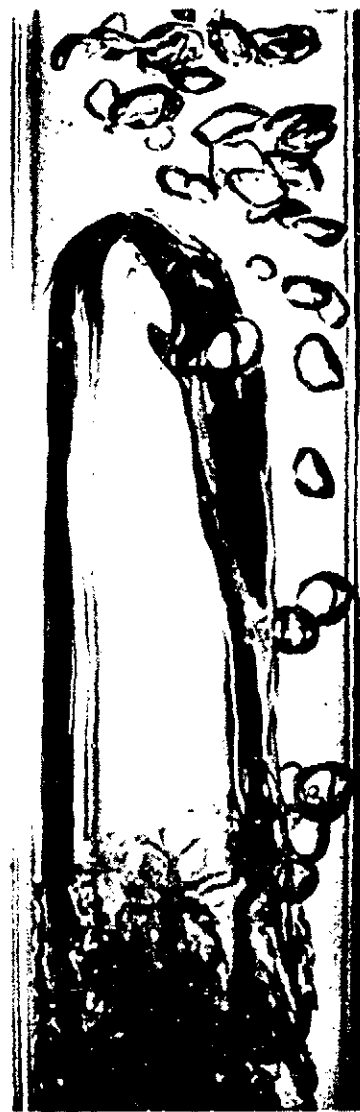
A cette configuration, nous donnons le nom de bulles agglomérées. Les sondes



Bulles indé-
pendantes



Bulles aggro-
mérées



Bouchon



semi-
annulaire



annulaire

Figure n° 5 - Configurations d'écoulements

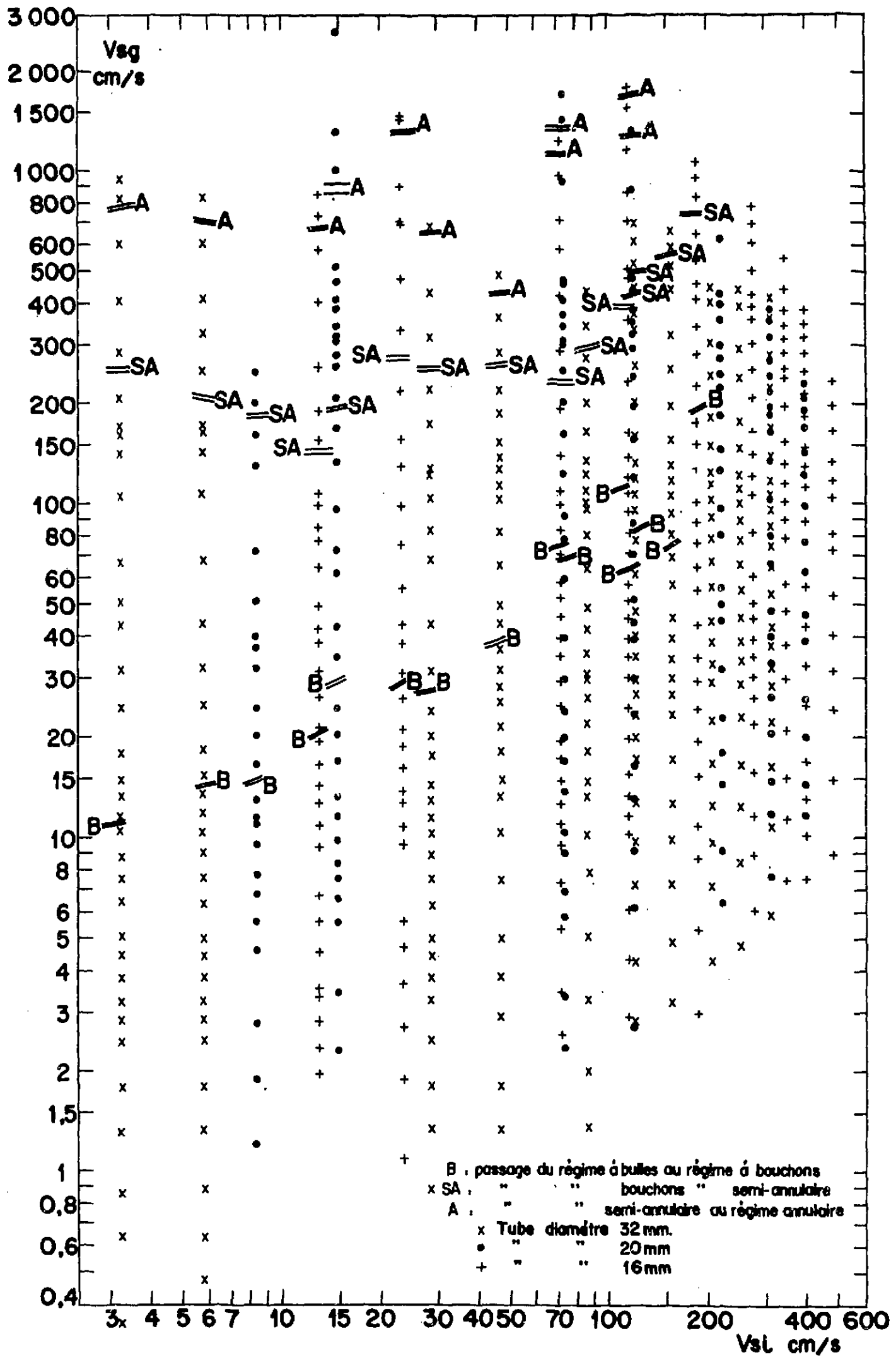


Figure n° 6 - Domaine d'étude

donnent encore des signaux de bulles à des intervalles de temps très courts. Nous constatons que les bulles se rapprochent de plus en plus les unes des autres, à mesure qu'elles montent pour former des sortes de paquets qui montent à une vitesse plus grande que la vitesse moyenne du mélange. Tant que le débit d'air n'a pas atteint une certaine valeur, on observe des bulles agglomérées dans toute la section du tube, puis lorsqu'on continue à faire croître le débit d'air, au sommet de la section d'essais, les paquets de bulles se transforment en bouchons. La sonde du haut donne alors un signal correspondant à des bouchons, alors que la sonde du bas donne un signal de bulles. Les bouchons apparaissent de plus en plus bas à mesure que le débit d'air croît, et finalement apparaissent au bas de la section d'essais. C'est à ce moment seulement que nous estimons que le régime à bouchons est établi dans le tube. Nous considérons donc le régime à bulles agglomérées comme un établissement du régime à bouchons. Nous estimons que les conditions de débits de chacune des phases sont celles du régime à bouchons, mais qu'il faut une certaine longueur pour que ce régime s'établisse (il faut en effet un certain temps pendant lequel le mélange monte dans le tube pour que les bulles s'agglomèrent et coalescent). Le régime à bulles agglomérées se différencie donc du régime à bulles indépendantes qui, lui est stable et se poursuit tout le long du tube, par son instabilité (nous avons eu des cas où, pour une cause inconnue, nous passions subitement au régime à bouchons) et son évolution le long du tube.

4.2 - Variations de la fraction de vide moyenne suivant la cote lors du régime à bulles agglomérées

Nous allons montrer l'évolution de la fraction de vide moyenne lorsqu'on se déplace de l'entrée vers la sortie du tube.

Il était nécessaire puisque nous voulions montrer l'influence de la cote de ne pas mesurer la fraction de vide moyenne sur des sections trop longues. Nous ne devons pas non plus trop perturber l'écoulement afin de ne pas passer brusquement au régime à bouchons. Comme nous voulions au moins mesurer la fraction de vide moyenne dans quatre sections superposées le système des vannes n'aurait pas été pratique.

Nous nous sommes donc placés dans un cas où l'on puisse déduire la fraction de vide moyenne de la perte de pression totale.

La perte de pression totale peut en effet être mise sous la forme :

$$\Delta P_{\text{tot}} = (1 - \langle \alpha \rangle) \Delta l \rho_l g + c$$

$(1 - \langle \alpha \rangle) \Delta l \rho_l g$ est la perte de pression due à la diminution du poids spécifique du mélange. Le terme c qui est inconnu représente les pertes de pression par frottements, et éventuellement par accélération.

$$\frac{\Delta P_{\text{tot}}}{\Delta l \rho_l g} = 1 - \langle \alpha \rangle + \frac{c}{\Delta l \rho_l g}$$

Sur la figure 7 nous avons représenté le rapport $\frac{\Delta P_{\text{tot}}}{\Delta l \rho_l g}$ en fonction de $\langle \alpha \rangle$ lorsque V_{sl} est égal à 28,5 cm/s, valeur pour laquelle les pertes de pression par frottement en liquide seul ΔP_1 sont faibles. ($\frac{\Delta P_1}{\Delta l \rho_l g} = 0,005$) - (les résultats numériques figurent sur le tableau 1).

Pour $0,05 < \langle \alpha \rangle < 0,45$, le terme $\frac{c}{\Delta l \rho_l g}$ est alors négligeable devant le terme $1 - \langle \alpha \rangle$.

On peut alors déduire $\langle \alpha \rangle$ de la mesure de la perte de pression totale :

$$\langle \alpha \rangle = 1 - \frac{\Delta P_{\text{tot}}}{\Delta l \rho_l g}$$

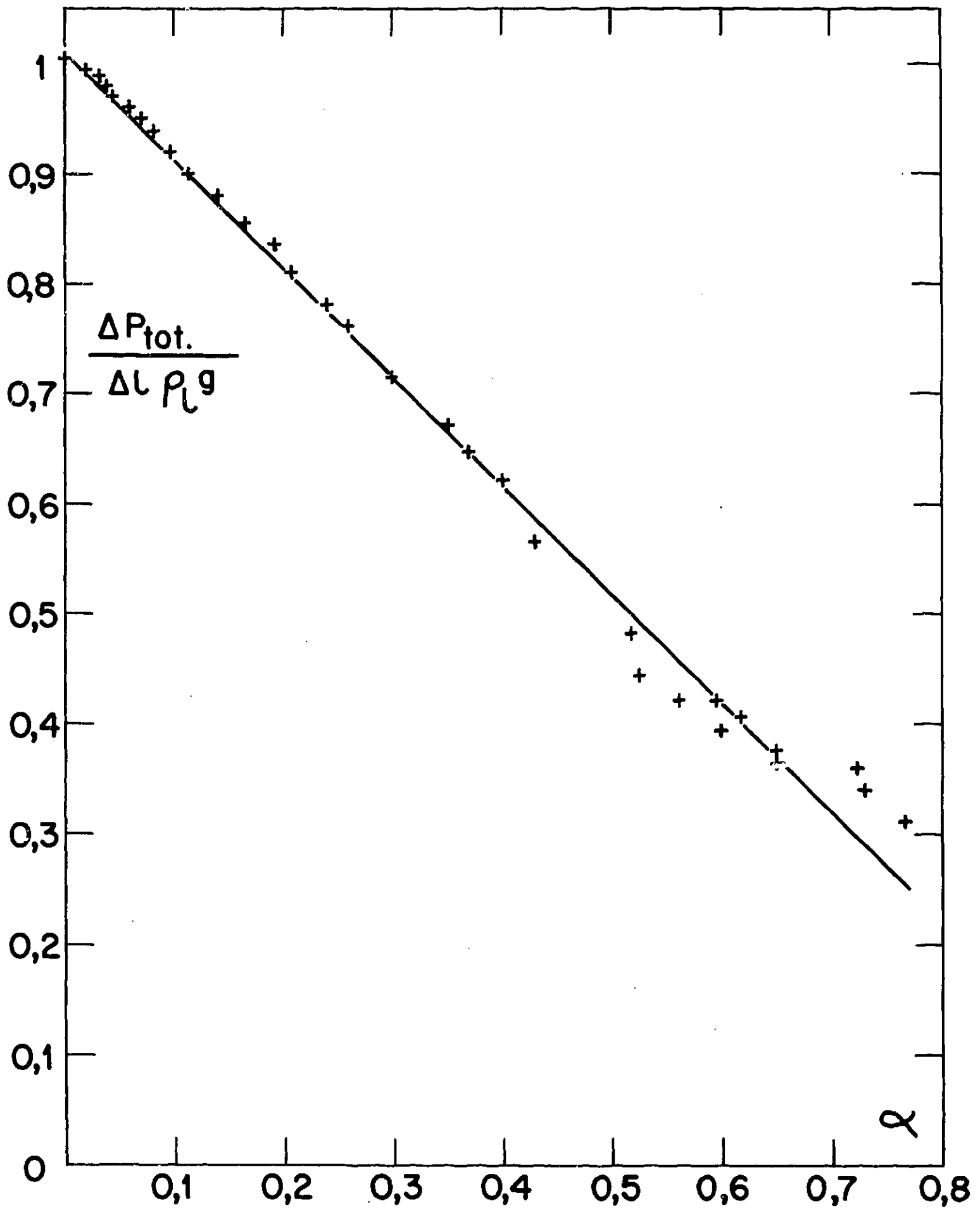


Figure n° 7 - Rapport $\frac{\Delta P_{tot.}}{\Delta l \rho_L g}$ en fonction de la fraction de vide moyenne

$$V_{sl} = 28,5 \text{ cm/s}$$

TABLEAU 1

$$V_{sl} = 28,5 \text{ cm/s}$$

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta l \rho_1 g} = 0,005$$

$\frac{\Delta T_{tot}}{\Delta l \rho_1 g}$	$\langle \alpha \rangle$	$\frac{\Delta P_{tot}}{\Delta l \rho_1 g}$	$\langle \alpha \rangle$
0,995	0,020	0,670	0,350
0,987	0,030	0,644	0,372
0,979	0,040	0,619	0,400
0,971	0,045	0,564	0,429
0,958	0,060	0,479	0,514
0,946	0,072	0,444	0,526
0,936	0,082	0,418	0,562
0,923	0,095	0,421	0,596
0,900	0,115	0,404	0,614
0,880	0,140	0,396	0,600
0,859	0,165	0,375	0,651
0,835	0,190	0,365	0,647
0,807	0,210	0,360	0,721
0,781	0,240	0,340	0,729
0,760	0,260	0,310	0,765
0,714	0,300		

Nous avons ainsi déterminé la fraction de vide moyenne dans quatre sections superposées pour une vitesse superficielle de la phase liquide de 18,3 cm/s et tracé les courbes $V_{sg} = f(\alpha)$ dans chacune de ces sections : figure 8. (Les résultats numériques figurent sur le tableau 2).

La vitesse V_{sg} est la vitesse superficielle au milieu de la section, calculée en tenant compte de la pression statique en ce point.

Nous constatons que lorsque $\langle \alpha \rangle$ est inférieur à 0,23, il existe une seule courbe $V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle)$ pour les 4 sections. Les sondes nous montrent qu'alors l'écoulement est à bulles indépendantes. Pour des valeurs de $\langle \alpha \rangle$ comprises entre 0,23 et 0,45 on obtient 4 branches correspondant à chacune des sections. Ces quatre branches rejoignent ensuite une courbe unique. D'après l'observation visuelle de l'écoulement et les signaux de sonde, les quatre branches correspondent au régime à bulles agglomérées, alors que la courbe unique correspond au régime à bouchons. Lors du régime à bulles agglomérées, pour une même vitesse superficielle de la phase gazeuse, peuvent donc exister de grandes différences dans la fraction de vide moyenne selon la distance de la section de mesure à l'entrée du tube.

Nous voyons par exemple sur la figure 8 que lorsque $V_{sg} = 16 \text{ cm/s}$, la fraction de vide moyenne dans la section du bas est $\langle \alpha \rangle = 0,380$, alors que dans la section du haut, elle est $\langle \alpha \rangle = 0,294$, ce qui fait une différence de 30 %.

Si nous voulons étudier, soit le régime à bulles indépendantes, soit le régime à bouchons, nous devons donc éliminer les points pour lesquels on obtient un écoulement à bulles agglomérées. Ils risqueraient en effet d'apporter trop de perturbations dans les résultats.

TABLEAU 2

Section 1		section 2		section 3		section 4	
V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$
1,806	0,038	1,877	0,040	1,954	0,038	2,038	0,040
2,207	0,044	2,293	0,050	2,386	0,048	2,487	0,054
2,579	0,058	2,679	0,060	2,786	0,062	2,903	0,068
3,025	0,070	3,141	0,070	3,266	0,072	3,401	0,080
3,400	0,078	3,529	0,086	3,668	0,084	3,818	0,092
3,951	0,096	4,099	0,104	4,257	0,104	4,426	0,112
4,733	0,122	4,906	0,125	5,092	0,126	5,291	0,134
5,325	0,140	5,516	0,142	5,721	0,146	5,939	0,156
6,646	0,172	6,877	0,176	7,123	0,178	7,387	0,184
7,970	0,206	8,238	0,204	8,254	0,208	8,828	0,216
9,666	0,244	9,974	0,252	10,30	0,246	10,66	0,248
10,29	0,268	10,61	0,264	10,96	0,266	11,32	0,262
11,02	0,282	11,35	0,270	11,72	0,278	12,11	0,272
11,84	0,296	12,20	0,304	12,57	0,290	12,98	0,276
12,57	0,312	12,94	0,314	13,34	0,300	13,77	0,284
13,54	0,330	13,92	0,332	14,34	0,310	14,80	0,286
14,23	0,346	14,63	0,342	15,07	0,320	15,54	0,294
15,25	0,360	15,67	0,364	16,12	0,322	16,63	0,298
16,27	0,382	16,70	0,368	17,19	0,320	17,73	0,312
18,20	0,412	18,68	0,372	19,23	0,320	19,82	0,344
19,29	0,420	19,79	0,388	20,36	0,334	20,97	0,360
23,36	0,452	23,95	0,392	24,60	0,406	25,27	0,418
26,72	0,444	27,37	0,424	28,09	0,438	28,81	0,452
31,13	0,424	31,89	0,462	32,66	0,474	33,45	0,486

$$V_{s1} = 18,3 \text{ cm/s}$$

Notons cependant qu'à notre avis, dans une section d'essais suffisamment loin du mélangeur, la frontière bulles indépendantes, bouchons, serait la frontière bulles indépendantes, bulles agglomérées de nos expériences.

4.3 - Régime à bouchons - passage en régime semi-annulaire

Le régime à bouchons est caractérisé par le passage alterné de grosses poches d'air comme celle représentée sur la troisième photographie de la figure 5 et d'un mélange d'eau et de bulles d'air. Ces poches d'air que nous désignons sous le terme de "bouchons" ont une tête arrondie, une partie cylindrique séparée de la paroi du tube par un film d'eau et se terminent par une queue composée de bulles très serrées. Ces bulles restent dans le sillage du bouchon et ne sont pas absorbées.

A faible vitesse superficielle du liquide les bouchons ont une forme régulière et montent dans le tube sans se déformer. Cette forme régulière ne se conserve pas à plus forte vitesse superficielle de l'eau, les bouchons présentent alors des contours beaucoup plus tourmentés, et montent dans le tube en se déformant. Le film d'eau entre le bouchon et la paroi du tube contient le plus souvent des bulles comme le montre la photographie.

Lorsque, à débit d'eau fixe, on fait croître le débit d'air, les bouchons s'allongent de plus en plus, et finalement la tête d'un bouchon rattrape la queue de celui qui le précède. Nous obtenons alors un écoulement d'air interrompu par des ponts d'eau. Cet écoulement désigné sous le nom de semi-annulaire est représenté sur la quatrième photographie de la figure 5. Contrairement à ce qui se passe pour le passage bulles bouchons, nous n'avons pas observé d'évolution le long du tube.

4.4 - Régime annulaire

L'écoulement annulaire est représenté sur la cinquième photographie de la figure 5. Les ponts d'eau ont totalement disparu. La majeure partie de la phase gazeuse s'écoule de façon continue au centre du tube, tandis qu'un film liquide qui entraîne parfois des bulles d'air s'écoule le long de la paroi. Nous n'avons pu obtenir ce régime que pour de faibles vitesses superficielles de la phase liquide.

4.5 - Frontières entre les régimes d'écoulement

(Les résultats numériques figurent sur les tableaux 3.1, 3.2, 3.3).

Sur les figures 9.1, 9.1 bis, 9.2, 9.3, nous avons tracé les frontières entre les régimes d'écoulement dans le diagramme V_{sl} , V_{sg} . La figure 9.1 bis est simplement un agrandissement près des axes, de la figure 9.1, pour bien montrer que les frontières bulles indépendantes, bulles agglomérées et bulles agglomérées, bouchons, ne passent pas par l'origine quand V_{sl} est nul. Nous n'avons pas tracé les frontières entre les régimes semi-annulaire, annulaire, ce dernier type d'écoulement ayant été rencontré dans peu de cas, nous n'avons pas pu définir ses limites avec suffisamment de précision.

Sur les figures 10.1, 10.2, 10.3, nous avons tracé les frontières bulles indépendantes, bulles agglomérées et bulles agglomérées, bouchons, dans le diagramme $\langle \alpha \rangle$, V_{sg} .

Nous voyons que le régime à bulles agglomérées se rencontre pour une assez grande gamme de fractions de vide, et pratiquement dans toute cette zone l'écoulement évolue le long du canal, passant progressivement du régime à bulles au régime à bouchons.

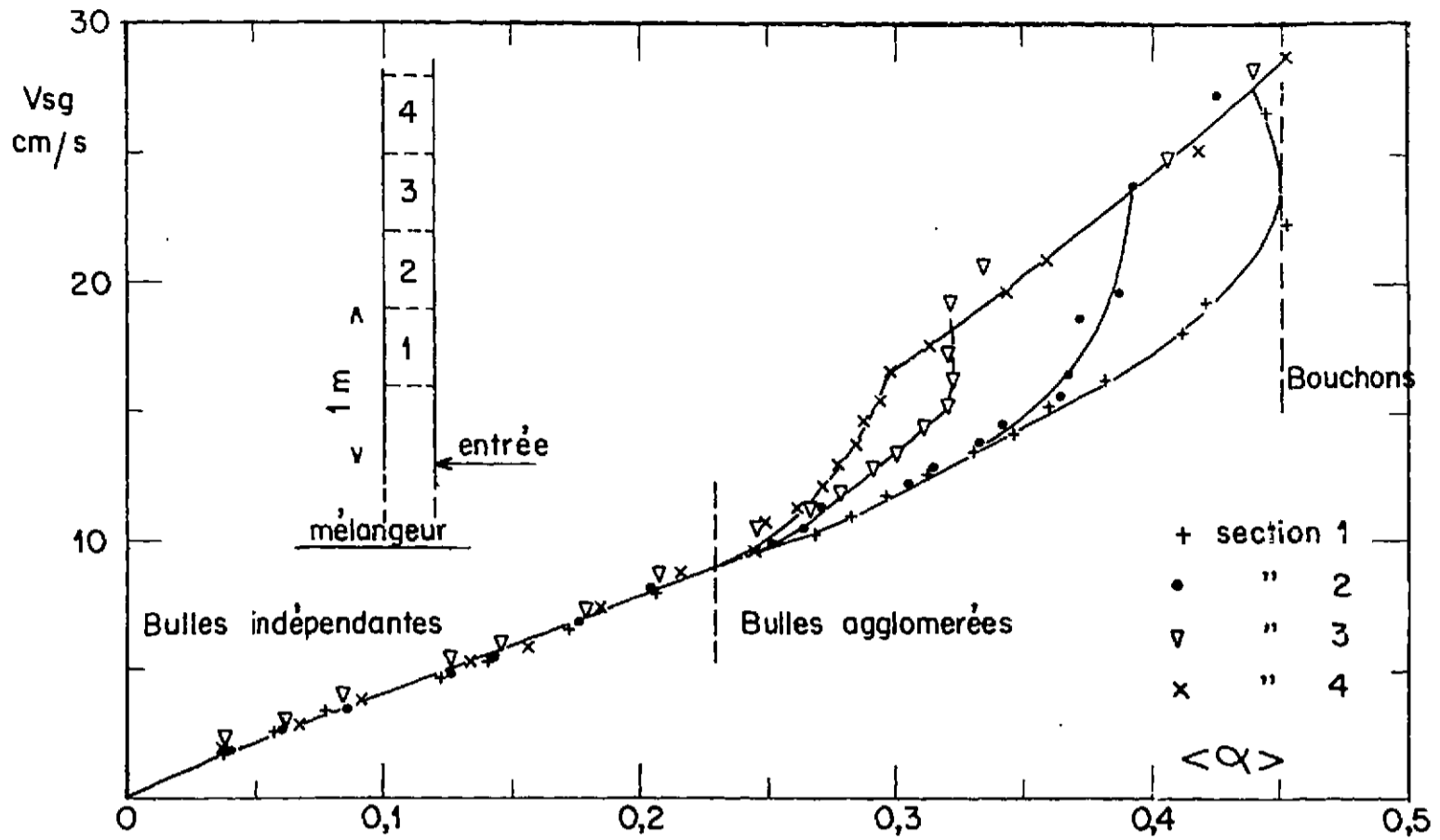


Figure n° 8 - Vitesse superficielle de la phase gazeuse en fonction de la fraction de vide moyenne dans des sections d'essais à différentes distances de l'entrée du canal.

$$V_{sl} = 18,3 \text{ cm/s.}$$

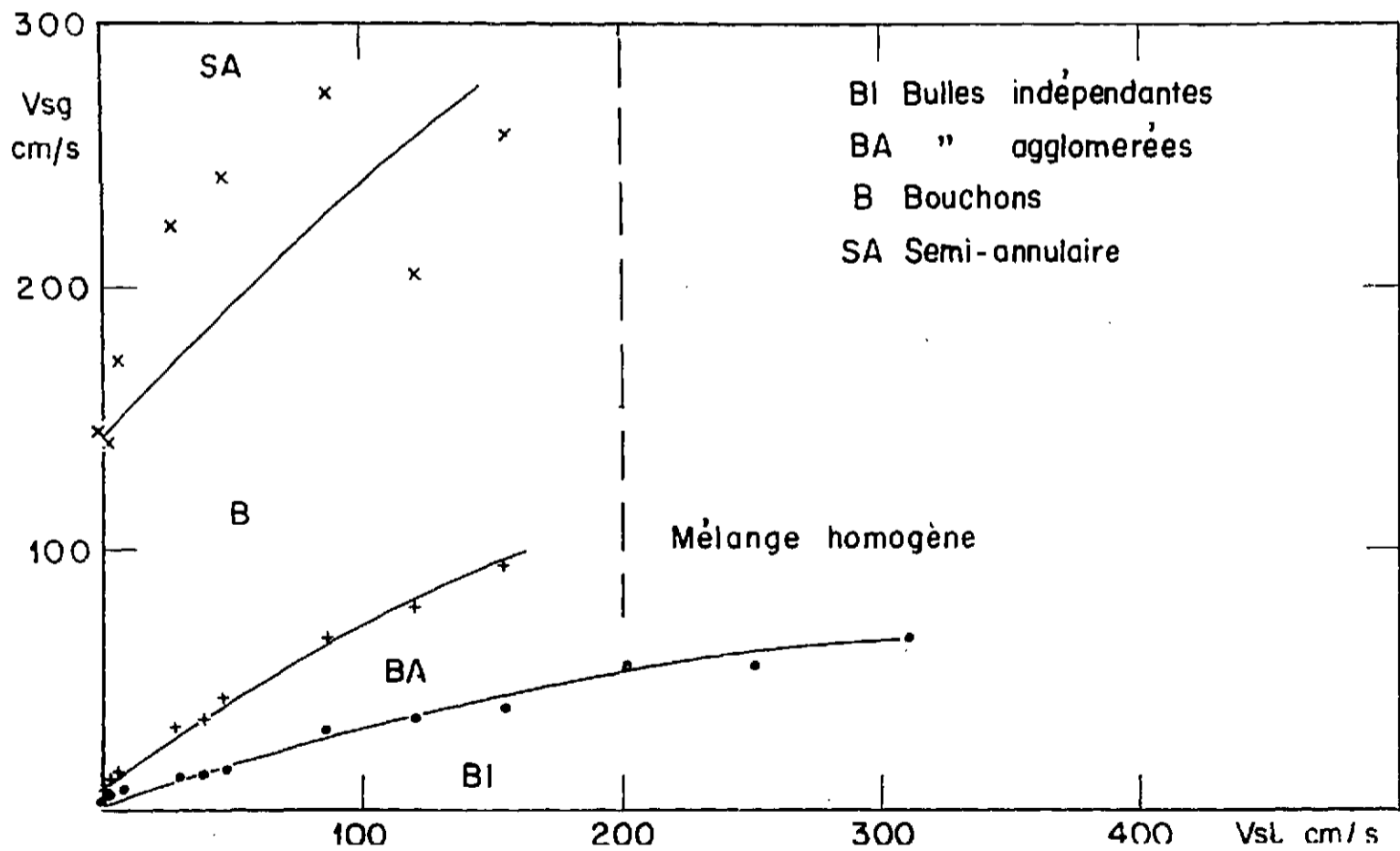


Figure n° 9-1 - Frontières entre les régimes d'écoulements
Diagramme $V_{sg} - V_{sl}$ - Tube de diamètre 32 mm.

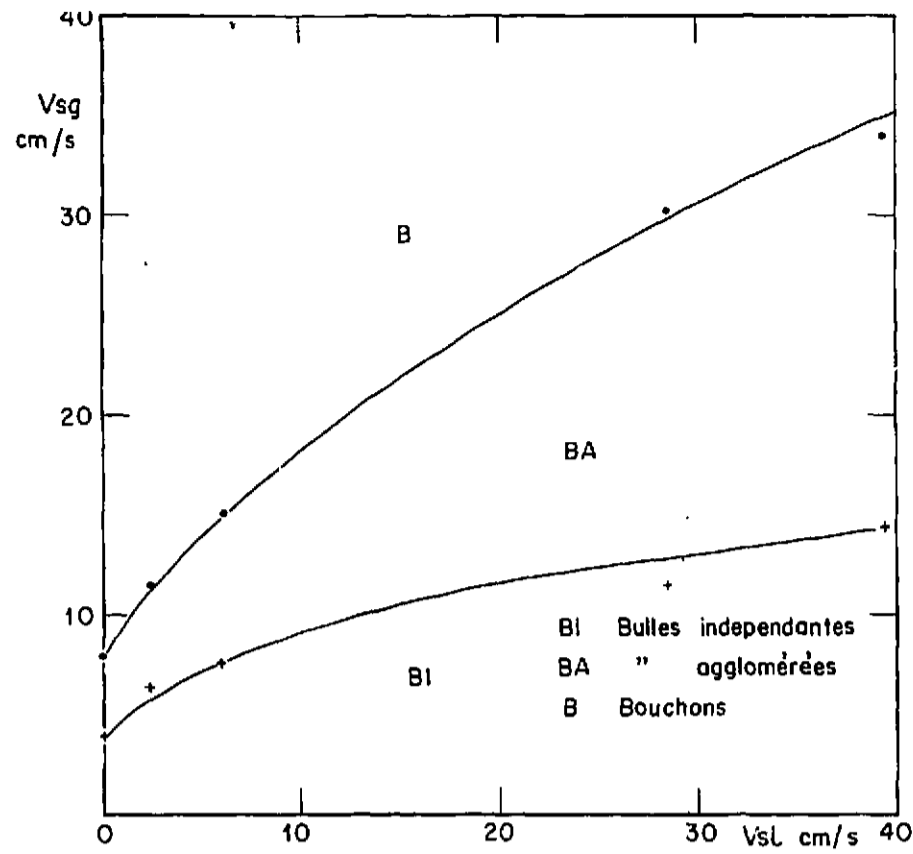


Figure n° 9-1 bis - Frontières entre les régimes d'écoulements
 Diagramme V_{sg} - V_{sl} - Tube de diamètre 32 mm.
 Fig. 9-1 agrandie au voisinage de l'origine.

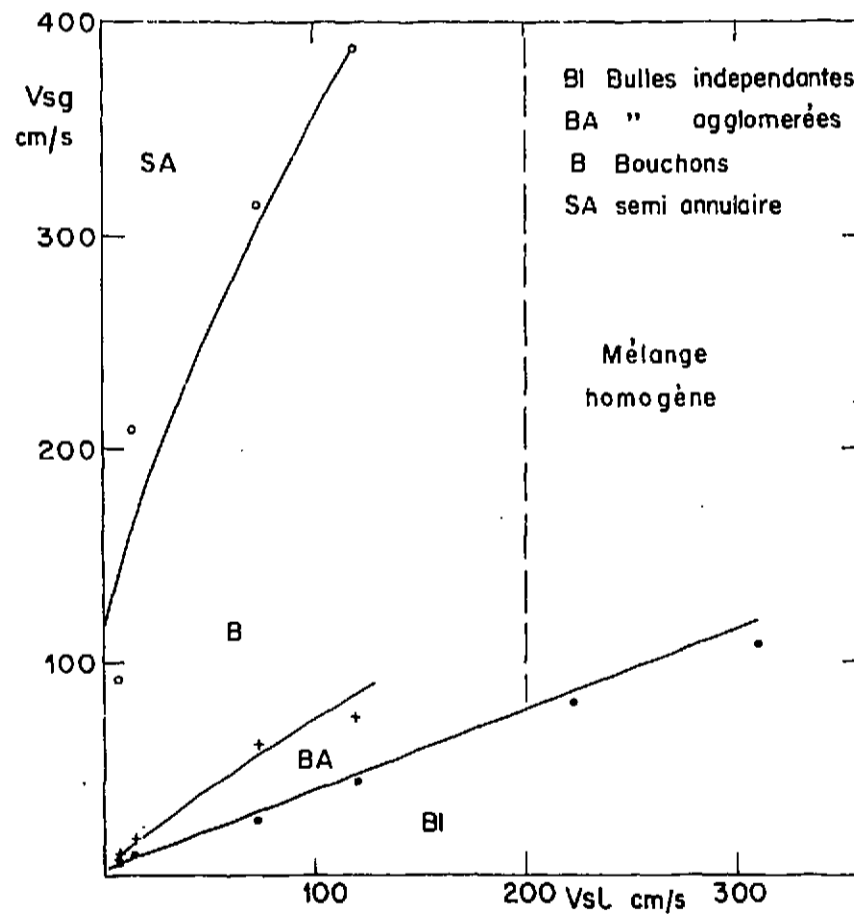


Figure n° 9-2 - Frontières entre les régimes d'écoulements
 Diagramme V_{sl} - V_{sl} - Tube de diamètre 20 mm.

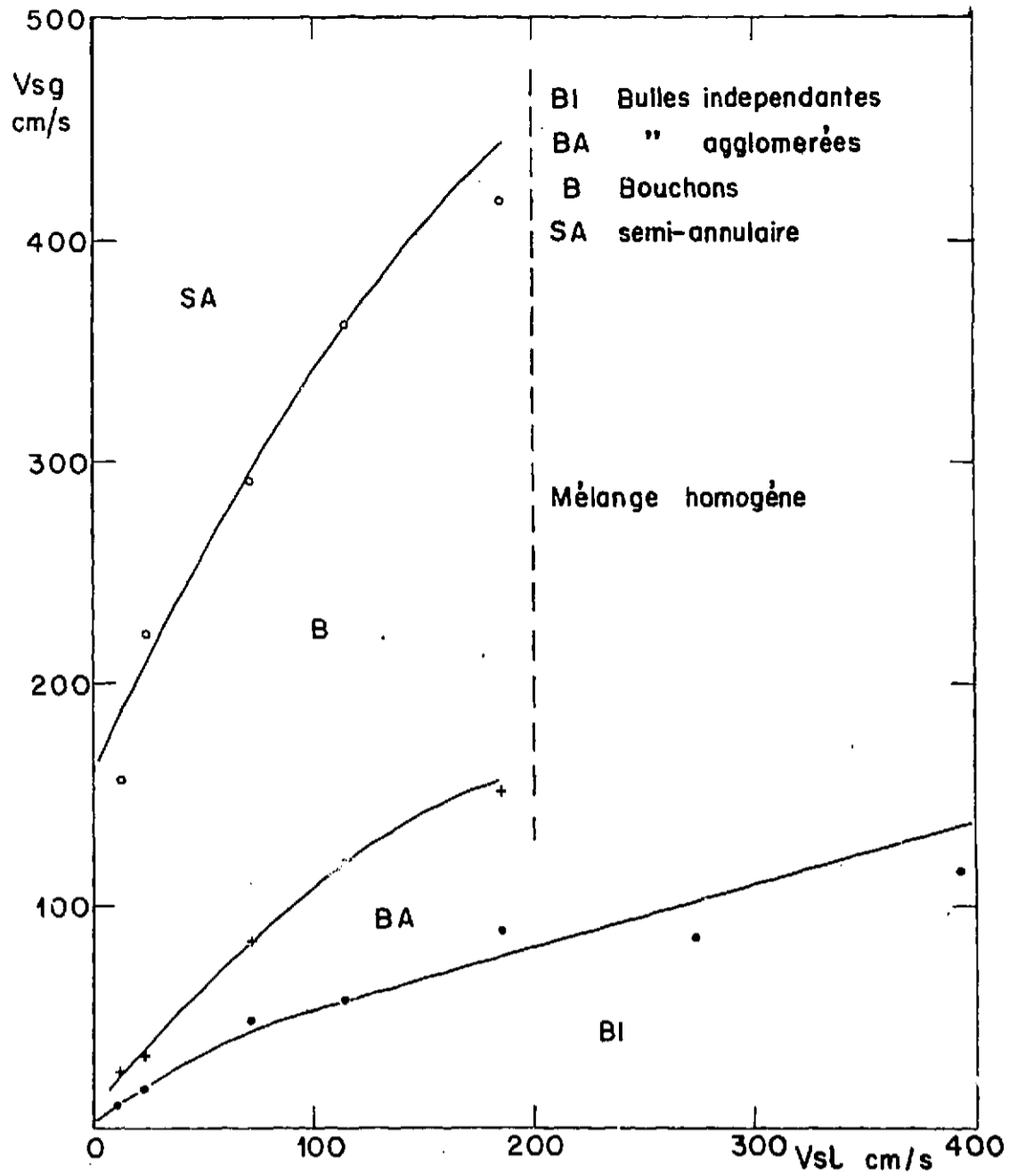


Figure n° 9-3 - Frontières entre les régimes d'écoulements
Diagramme V_{sg} - V_{sl} - Tube de diamètre 16 mm.

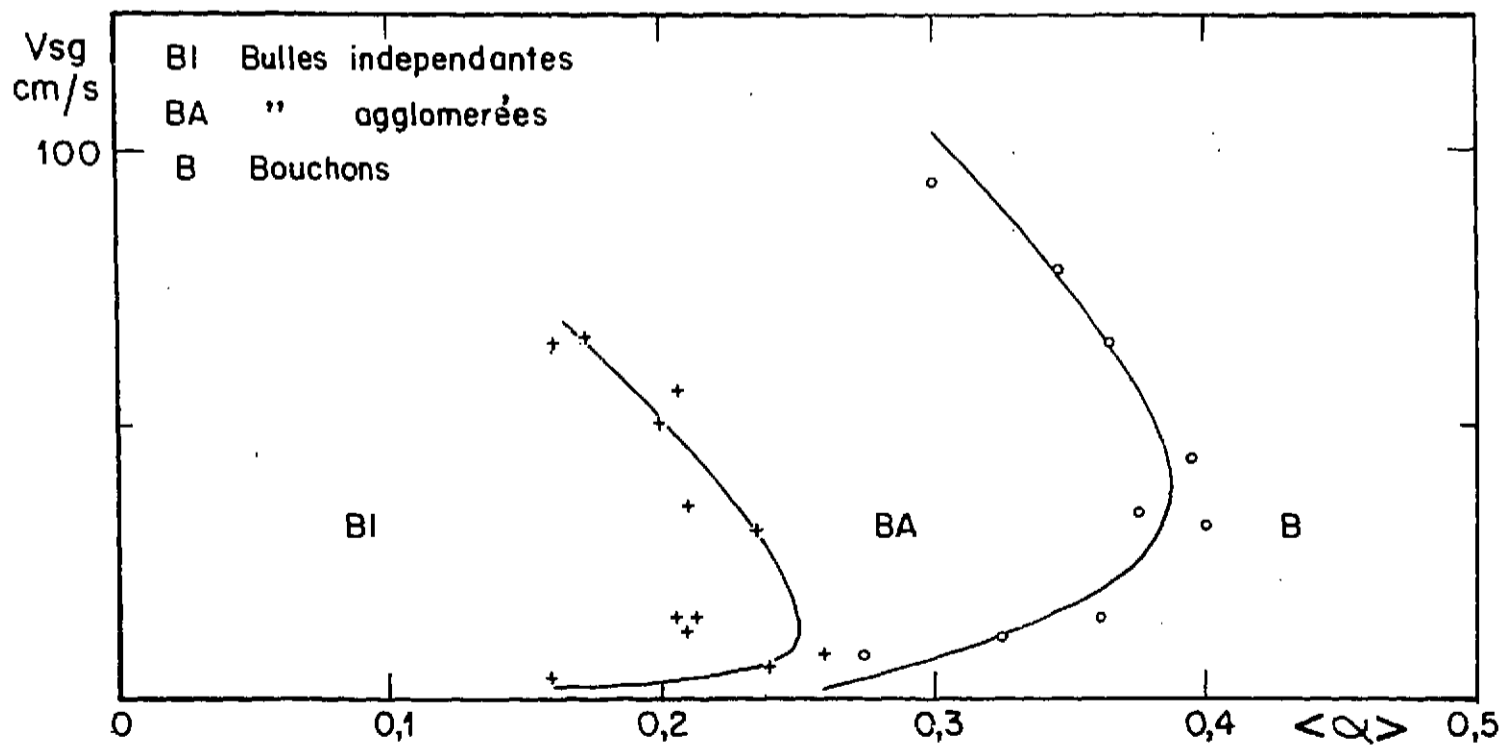


Figure n° 10-1 - Frontières entre les régimes à bulles et le régime à bouchons -
Diagramme V_{sg} - $\langle \alpha \rangle$ - Tube de diamètre 32 mm.

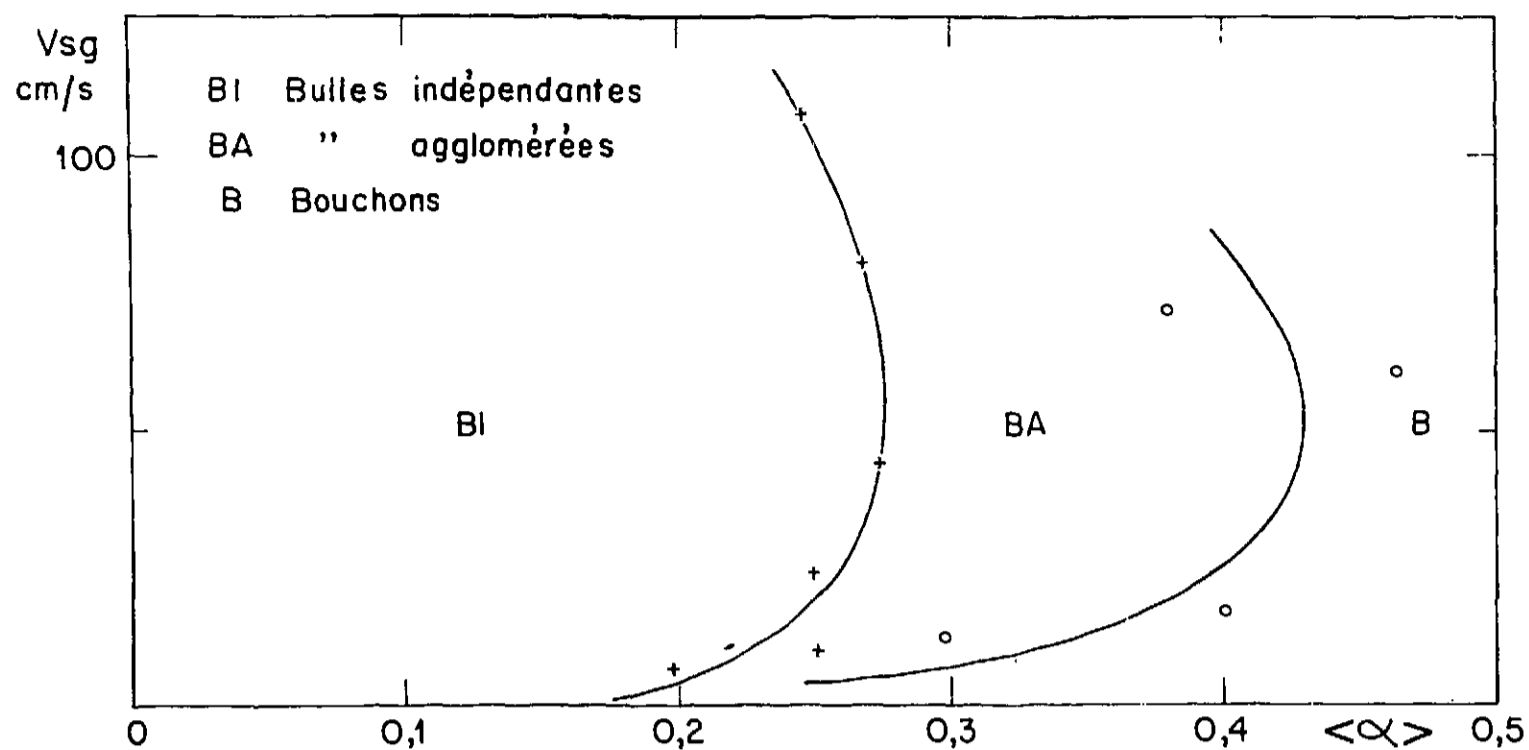


Figure n° 10-2 - Frontières entre les régimes à bulles et le régime à bouchons.
Diagramme $V_{sg}-\langle \alpha \rangle$ - Tube de diamètre 20 mm.

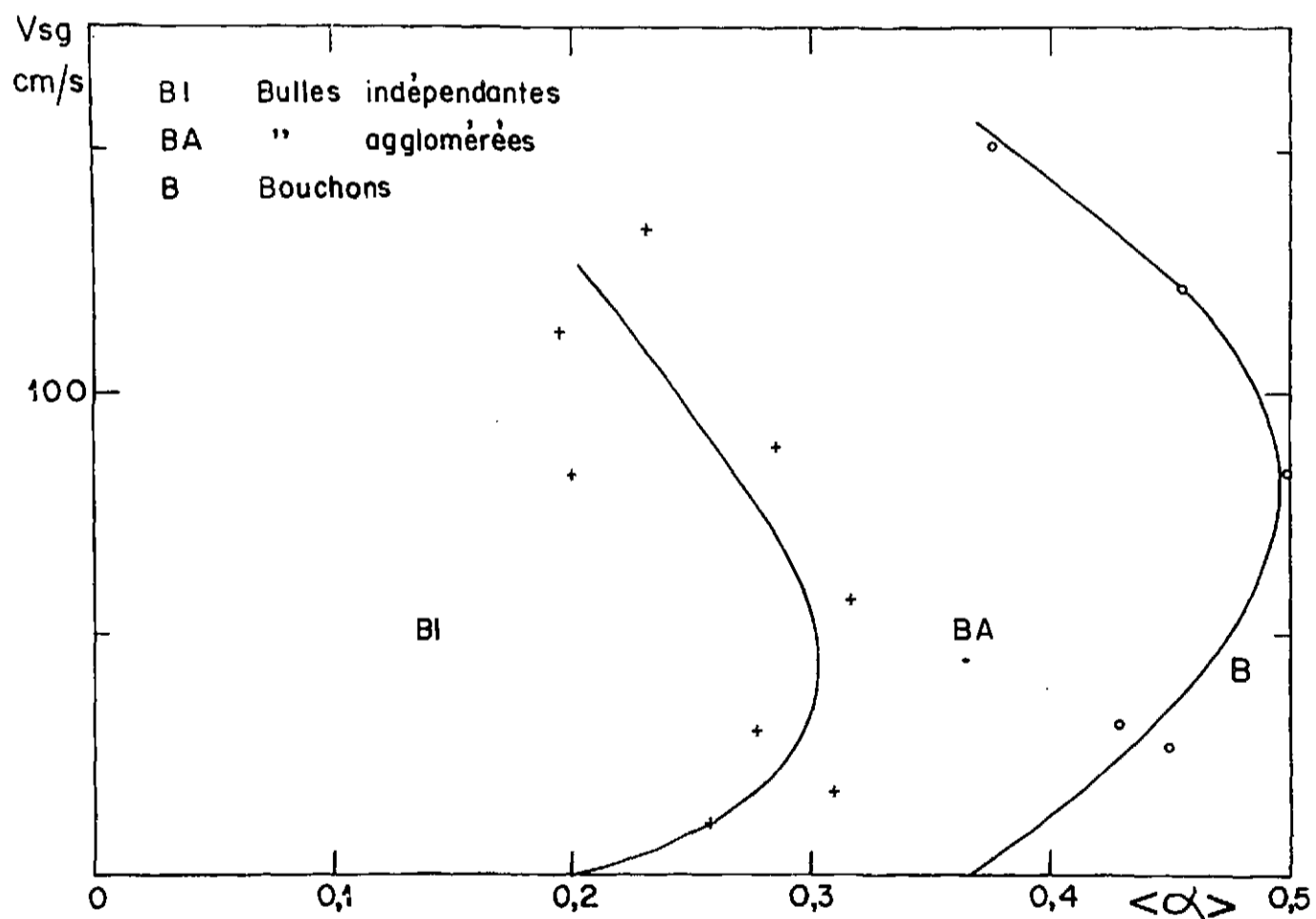


Figure n° 10-3 - Frontières entre les régimes à bulles et le régime à bouchons.
Diagramme $V_{sg}-\langle \alpha \rangle$ - Tube de diamètre 16 mm.

TABLEAU 3.1

V_{sl} cm/s	Transition bulles indépendantes, bulles agglomérées		Transition bulles agglomérées, bouchons		Transition bouchons, semi-annulaire	
	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$
0	3,97	0,180	7,98	0,275	145	0,705
3,26	6,45	0,240	11,5	0,325	141	0,726
5,79	7,59	0,260	15,1	0,362	172	0,715
28,5	11,5	0,210	32,0	0,400	224	0,647
46,4	15,0	0,205	44,3	0,395	242	0,637
86,1	31,2	0,235	64,7	0,365	275	0,591
120	35,0	0,210	78,3	0,327	204	0,472
155	39,5	0,200	94,0	0,300	259	0,461
205	56,0	0,207	-	-	-	-
252	55,8	0,172	-	-	-	-
311	65,0	0,160	-	-	-	-

Transitions entre les régimes d'écoulements. Tube de diamètre 32 mm.

TABLEAU 3.2

V_{sl} cm/s	Transition bulles indépendantes, bulles agglomérées		Transition bulles agglomérées, bouchons		Transition bouchons, semi-annulaire	
	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$
8,39	6,84	0,198	11,1	0,296	92,0	0,714
14,8	9,92	0,252	17,0	0,400	210	0,758
73,1	24,0	0,249	60,5	0,464	314	0,626
119	44,4	0,274	71,8	0,380	388	0,590
221	81,0	0,268	-	-	-	-
309	108	0,245	-	-	-	-
397	123	0,214	-	-	-	-

Transition entre les régimes d'écoulements. Tube de diamètre 20 mm.

TABLEAU 3.3

V_{sl} cm/s	Transition bulles indépendantes, bulles agglomérées		Transition bulles agglomérées, bouchons		Transition bouchons, semi-annulaire	
	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle$
13,1	10,9	0,258	26,5	0,450	156	0,750
23,2	16,6	0,309	31,5	0,429	222	0,709
71,6	29,9	0,277	84,0	0,500	291	0,640
114	57,6	0,317	121	0,455	361	0,595
186	88,9	0,285	151	0,375	419	0,540
274	83,4	0,200	-	-	-	-
345	134	0,230	-	-	-	-
396	113	0,195	-	-	-	-

Transition entre les régimes d'écoulements - Tube de diamètre 16 mm.

5 - RELATION ENTRE LES VITESSES SUPERFICIELLES ET LA FRACTION DE VIDE MOYENNE

5.1 - Résultats antérieurs

5.1.1 - Résultats de ARMAND et de BANKOFF

ARMAND [2], par une étude expérimentale et BANKOFF [5], par une étude théorique, trouvent que la fraction de vide moyenne peut être exprimée par la formule :

$$\langle \alpha \rangle = K \frac{V_{sg}}{V_{sg} + V_{sl}} \quad (1)$$

D'après ARMAND, lorsque le rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sg} + V_{sl}}$ est inférieur à 0,9, K est une constante égale à 0,833.

BANKOFF estime que K peut prendre des valeurs différentes comprises entre 0,6 et 1 suivant les profils de vitesse et de fraction de vide.

L'équation (1) peut encore être mise sous la forme :

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle \alpha \rangle}{K - \langle \alpha \rangle} V_{sl} \quad (2)$$

Notons que BANKOFF suppose qu'en un point, la vitesse de la phase gazeuse est égale à la vitesse de la phase liquide.

5.1.2 - Résultats de BEHRINGER et de ZUBER

ZUBER [3], [4] estime qu'en un point la vitesse de la phase gazeuse est plus grande que la vitesse de la phase liquide, du fait de la différence de poids spécifique des deux phases.

Il fait d'ailleurs remarquer que déjà en 1936, pour le régime à bulles, BEHRINGER avait trouvé que la vitesse moyenne de la phase gazeuse $\langle V_g \rangle$ était égale à la somme des vitesses superficielles de chacune des phases, et de la vitesse de montée d'une bulle en milieu infini immobile :

$$\langle V_g \rangle = V_{sg} + V_{sl} + v_T \quad (3)$$

Comme $\langle V_g \rangle$ est égal à $\frac{V_{sg}}{\langle \alpha \rangle}$, l'équation (3) peut s'écrire :

$$V_{sg} = \frac{\langle \alpha \rangle}{1 - \langle \alpha \rangle} (V_{sl} + v_T) \quad (4)$$

ZUBER reprend les hypothèses de BANKOFF en supposant que la vitesse locale de la phase gazeuse est $V_g = V_l + v$ et arrive à la relation :

$$\langle V_g \rangle = Co (V_{sg} + V_{sl}) + u \quad (5)$$

Pour le régime qu'il désigne par "churn turbulent bubbly", il donne à Co la valeur 1,13 et à u la valeur

$$1,53 \left(\frac{\sigma_{lg} (\rho_1 - \rho_g)}{\rho_1^2} \right)^{1/4} \quad \text{ou} \quad 1,18 \left(\frac{\sigma_{lg} (\rho_1 - \rho_g)}{\rho_1^2} \right)^{1/4},$$

et pour le régime à bouchons $Co = 1,2$ et $u = 0,35 \sqrt{\frac{g (\rho_1 - \rho_g)}{\rho_1}}$

Pour le régime annulaire ZUBER recommande de prendre $Co = 1$.

En introduisant $\langle \alpha \rangle$ dans l'équation (5), nous pouvons la mettre sous la forme :

$$V_{sg} = \frac{\langle \alpha \rangle}{\frac{1}{Co} - \langle \alpha \rangle} \left(V_{sl} + \frac{u}{Co} \right) \quad (6)$$

On voit que :

$$\frac{1}{Co} \text{ est l'équivalent de } K.$$

L'équation (6) se présente donc comme une combinaison des équations (2) et (4).

5.2 - Variations de V_{sg} en fonction de $\langle \alpha \rangle$ à V_{sl} constant

Pour les trois tubes, nous avons tracé en coordonnées log-log les courbes $V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle)$: figures 11.1, 11.2, 11.3 (les résultats numériques sont donnés dans les tableaux 4.1, 4.2, 4.3). Sur les graphiques nous avons aussi tracé les frontières entre les régimes d'écoulement afin de voir si à chaque régime correspond une allure de courbe différente.

Nous remarquons que les portions de courbes qui correspondent aux régimes à bulles, et au régime à bouchons se déduisent les unes des autres par une translation suivant l'axe des ordonnées.

La fonction $\log(V_{sg}) = F(\log \langle \alpha \rangle, V_{sl})$ peut donc être mise sous la forme

$$\log(V_{sg}) = \log(f(\langle \alpha \rangle)) + \log(g(V_{sl}))$$

donc :

$$V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) \cdot g(V_{sl}) \quad (7)$$

Nous retrouvons une équation de la même forme que les équations (2), (4) et (6).

Cas du régime à bulles indépendantes

Les portions de courbes correspondant au régime à bulles indépendantes sont des droites parallèles.

Pour une valeur V_{sl1} donnée on a donc :

$$\log V_{sg1} = n \log \langle \alpha \rangle + \log k_1$$

$$V_{sg1} = k_1 \langle \alpha \rangle^n$$

Pour le régime à bulles indépendantes on peut mettre V_{sg} sous la forme :

$$V_{sg} = \langle \alpha \rangle^n g(V_{sl}) \quad (8)$$

5.3 - Insuffisance du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$ pour la détermination de $\langle \alpha \rangle$

D'après l'équation (2), pour K constant ou K uniquement fonction de $\langle \alpha \rangle$, on peut écrire :

$$V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) V_{sl}$$

Le rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$ serait donc uniquement fonction de $\langle \alpha \rangle$, ou ce qui revient au même, $\langle \alpha \rangle$ serait uniquement fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$.

En considérant la figure 11.1, on voit tout de suite que cette forme ne convient pas lorsque $V_{sl} = 0$, puisqu'elle conduit à $V_{sg} = 0$, alors qu'expérimentalement on obtient une fonction de $\langle \alpha \rangle$.

Nous allons toutefois voir si dans certains domaines, l'équation (2) permet de déterminer $\langle \alpha \rangle$ avec une approximation suffisante.

Sur les figures 12.1, 12.2, 12.3, nous avons porté en coordonnées log-log, le rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$ en fonction de $\langle \alpha \rangle$. (les résultats numériques figurent sur les tableaux 4.1, 4.2, 4.3.).

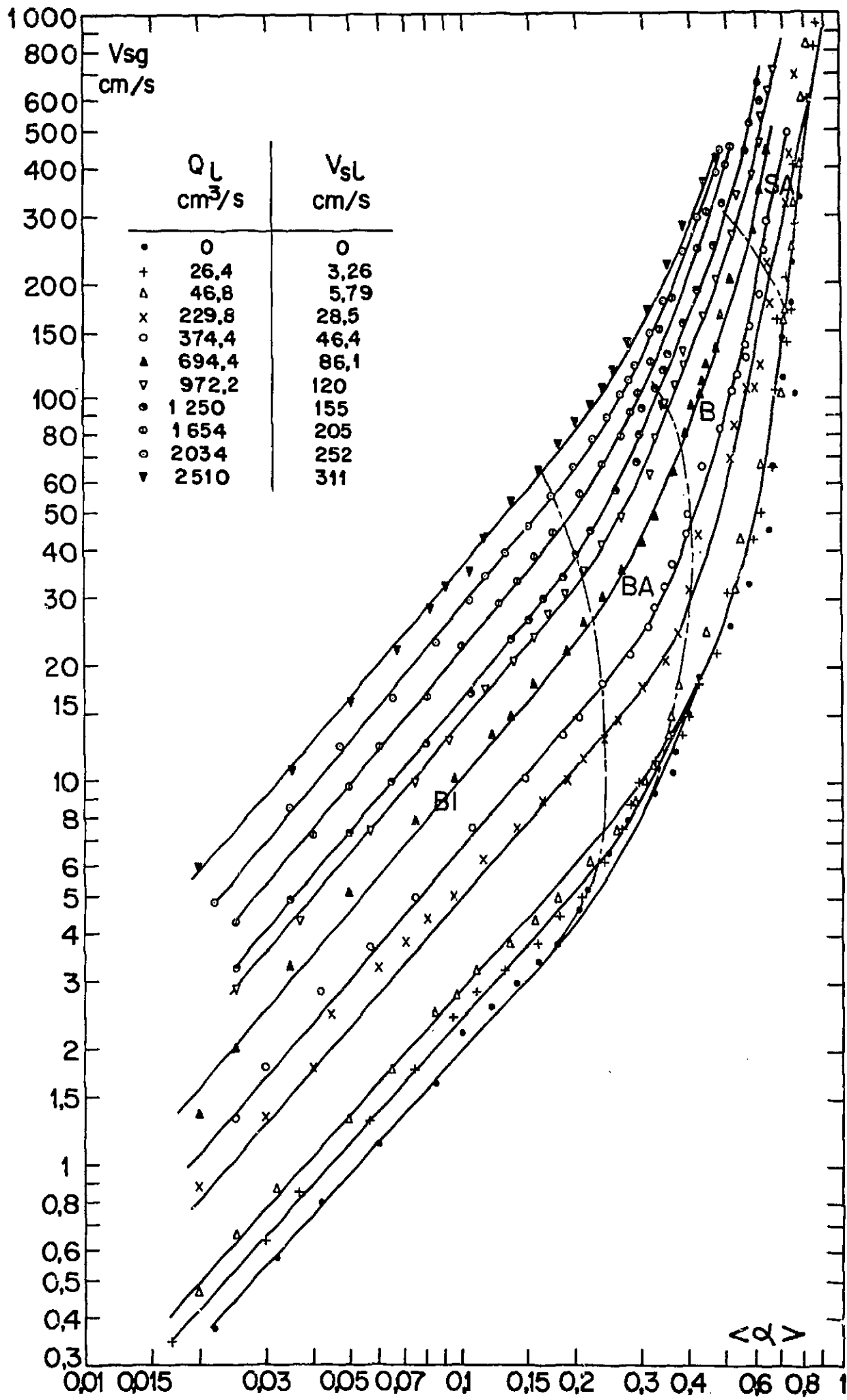


Figure n° 11-1 - Fraction de vide moyenne en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse - Tube de diamètre 32 mm.

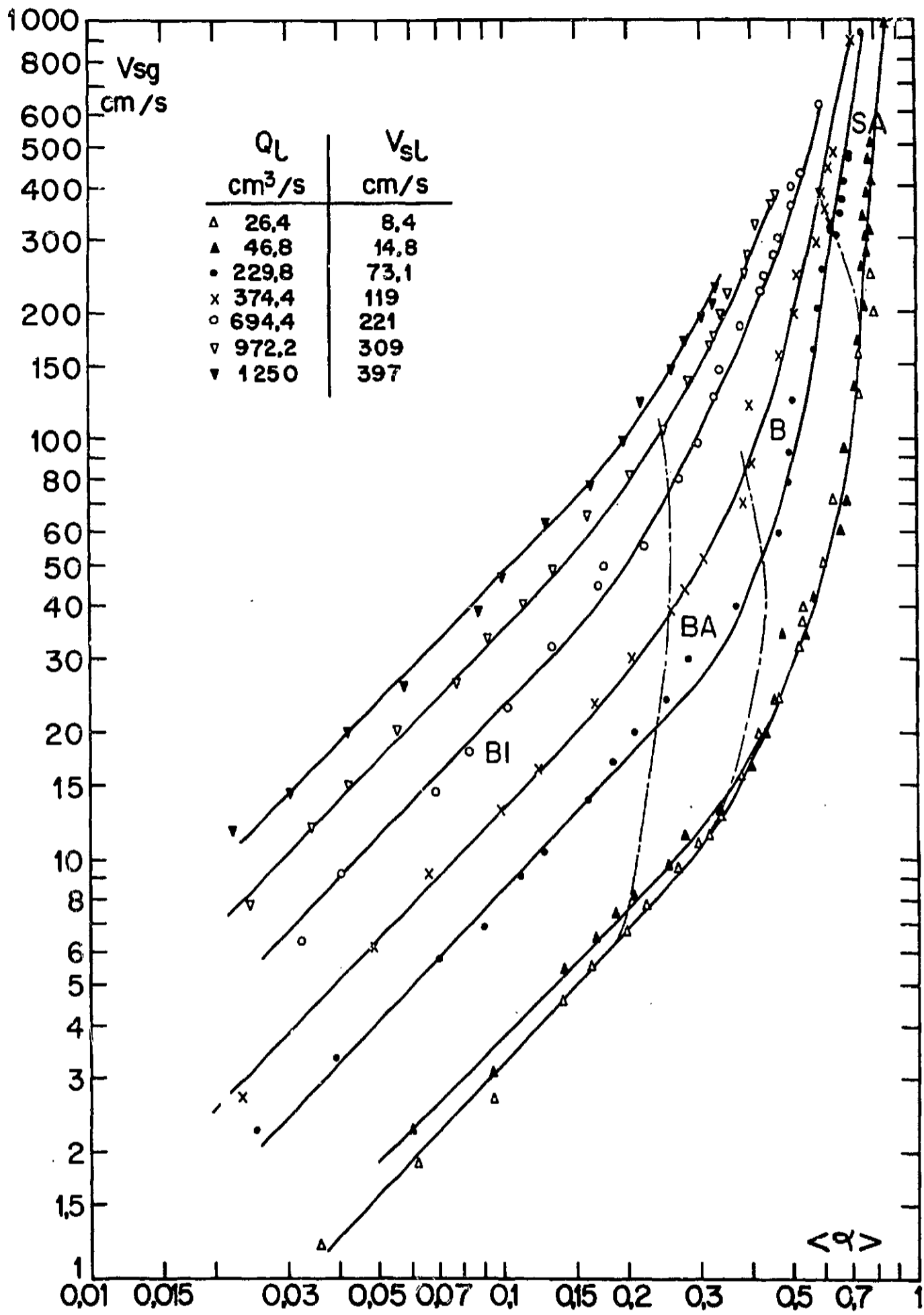


Figure n° 11-2 - Fraction de vide moyenne en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse - Tube de diamètre 20 mm.

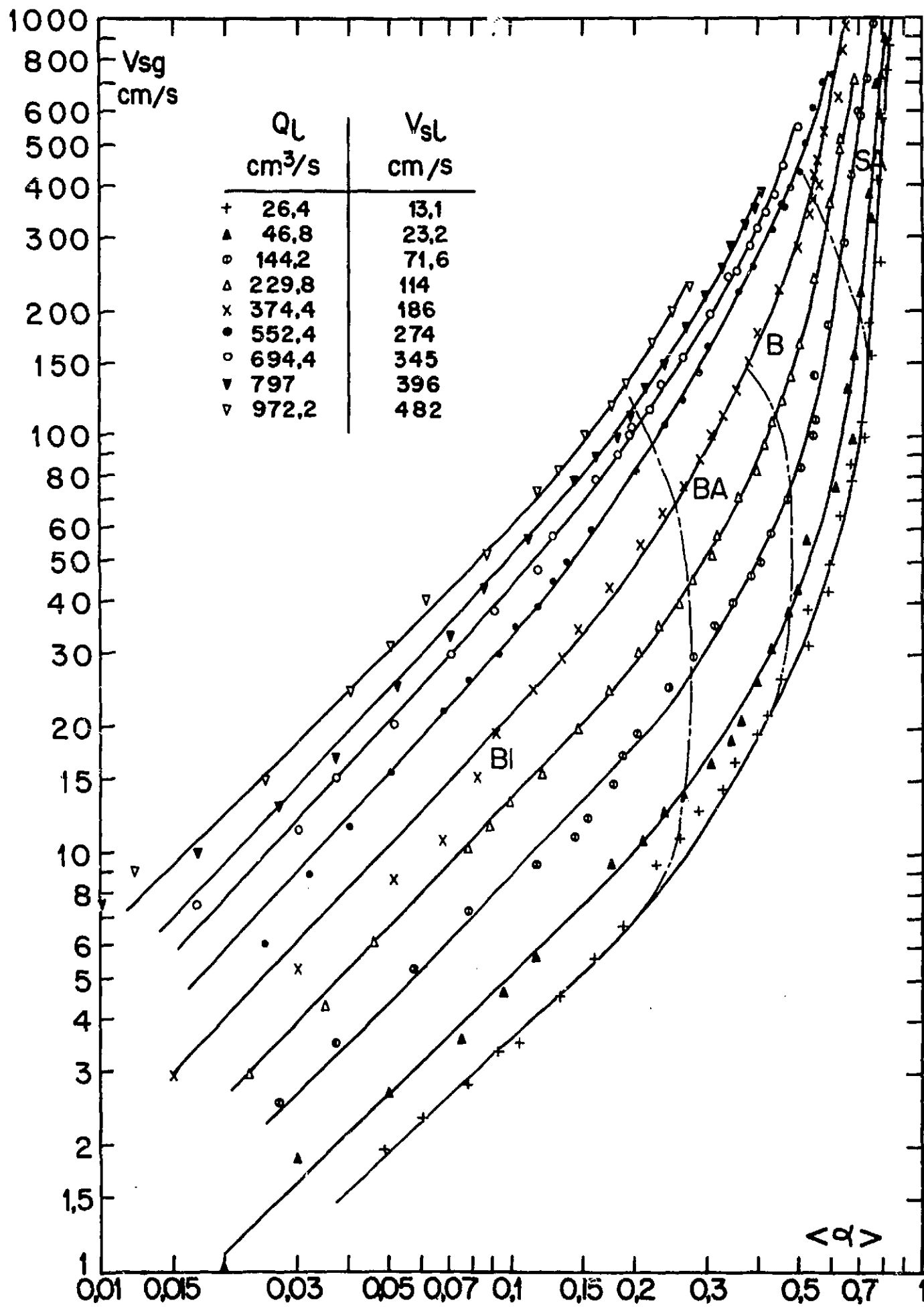


Figure n° 11-3 - Fraction de vide moyenne en fonction de la vitesse superficielle de la phase gazeuse - Tube de diamètre 16 mm.

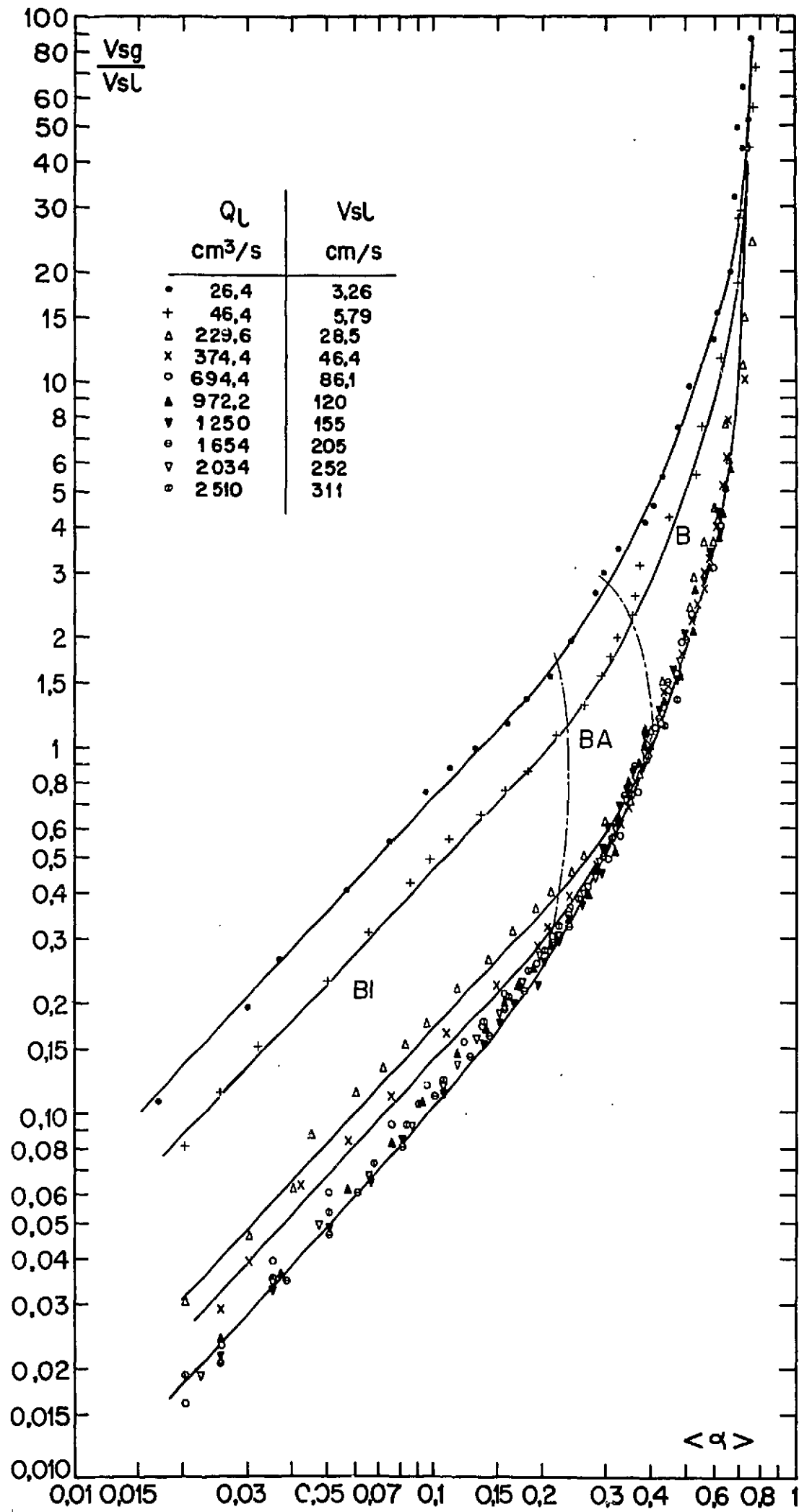


Figure n° 12-1 - Rapport des vitesses superficielles en fonction de la fraction de vide moyenne - Tube de diamètre 32 mm.

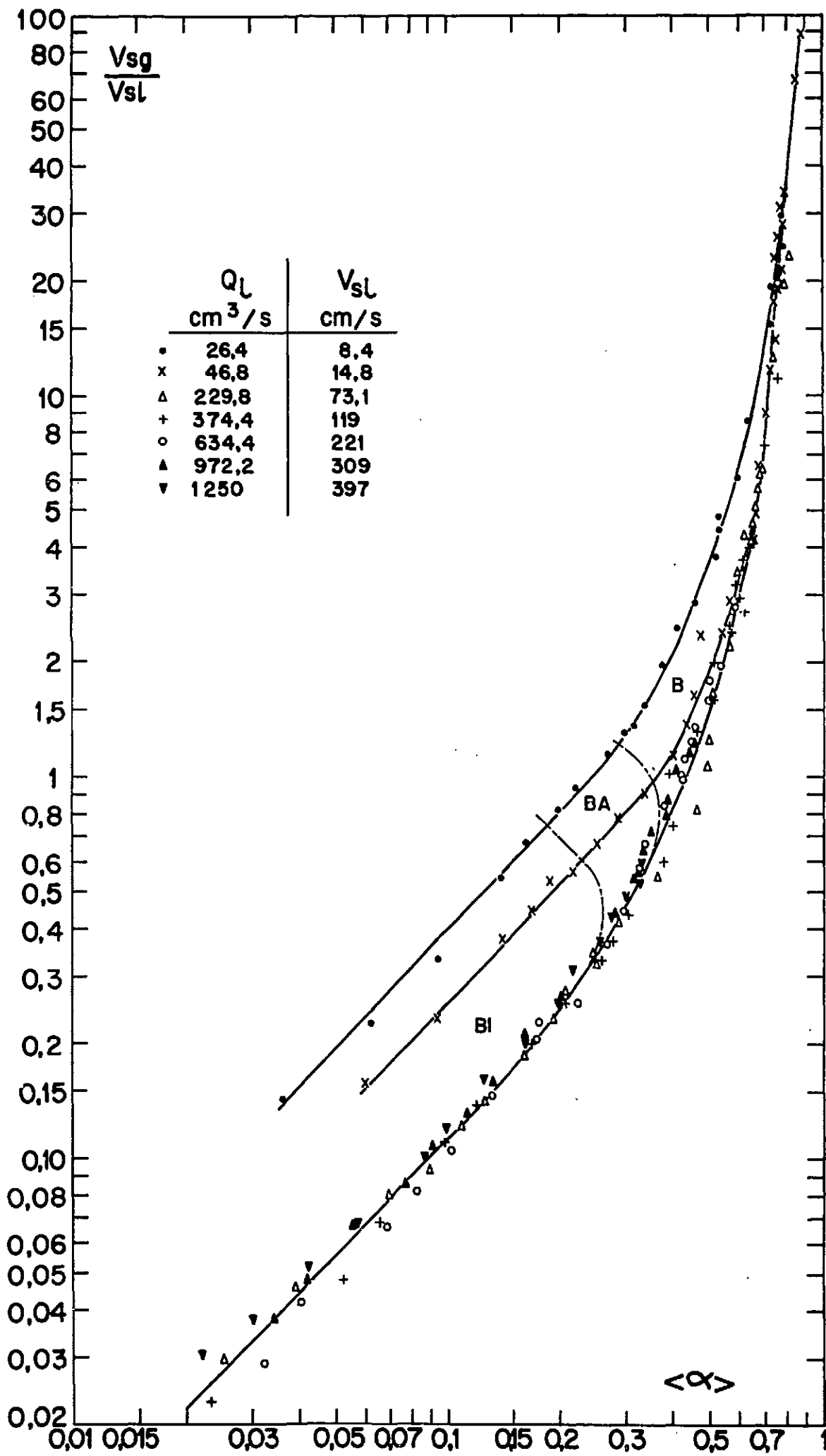


Figure n° 12-2 - Rapport des vitesses superficielles en fonction de la fraction de vide moyenne - Tube de diamètre 20 mm.

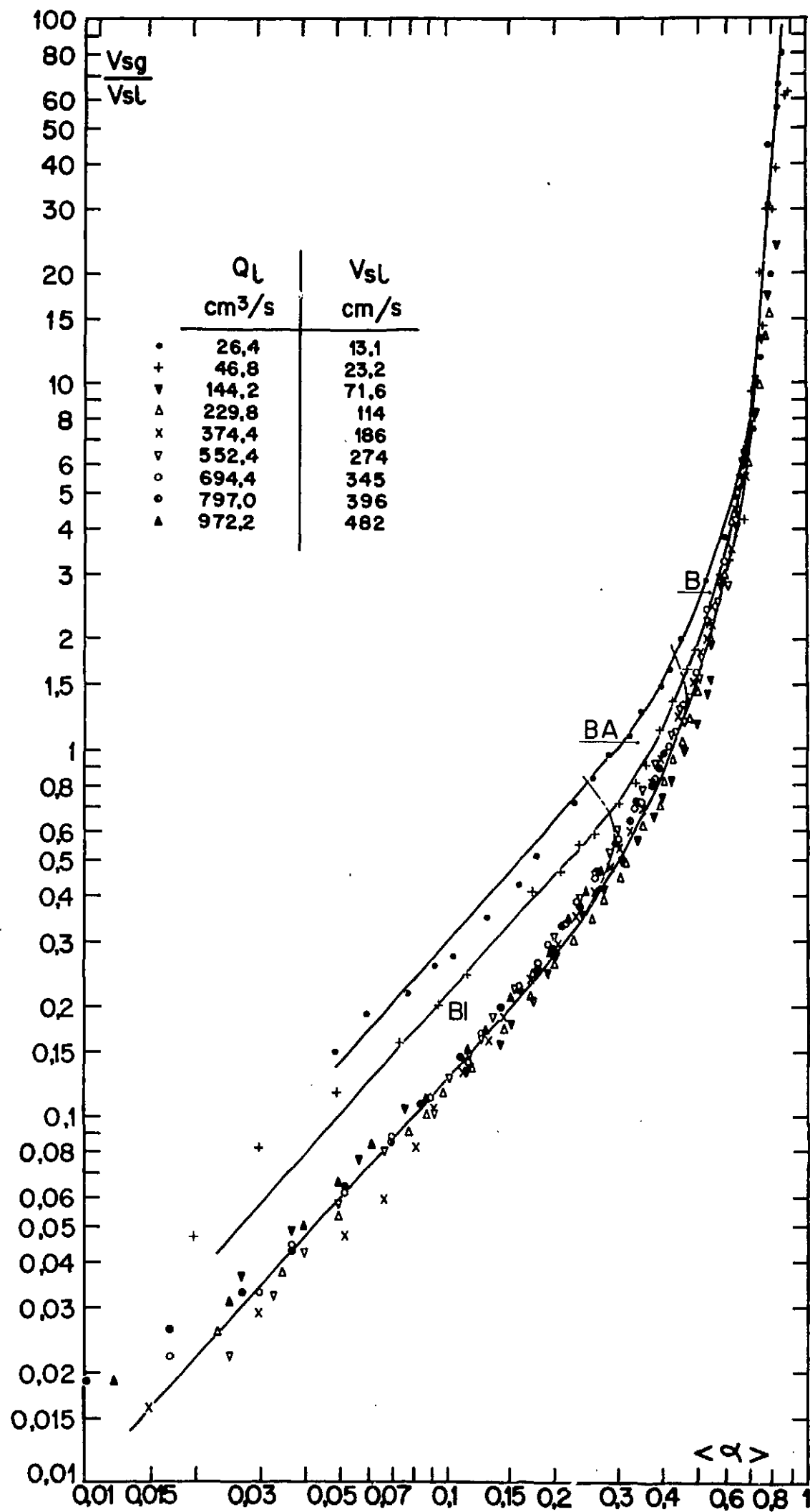


Figure n° 12-3 - Rapport des vitesses superficielles en fonction de la fraction de vide moyenne - Tube de diamètre 16 mm.

Pour de fortes vitesses superficielles de la phase liquide, les points se rassemblent autour d'une courbe unique.

Nous avons bien alors :

$$\frac{V_{sg}}{V_{sl}} = f(\langle \alpha \rangle)$$

$$V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) V_{sl}$$

Mais cette relation n'est pas valable quels que soient V_{sg} et V_{sl} .

Nous voyons notamment sur la figure 12.1 qu'un paramétrage en V_{sl} continue d'exister pour $V_{sl} < 86,1$ cm/s et $V_{sg} < 1$ m/s.

5.4 - Variations de V_{sg} en fonction de V_{sl} à $\langle \alpha \rangle$ constant dans le cas du régime à bulles indépendantes

Si dans l'équation (7) nous faisons $\langle \alpha \rangle$ constant, nous obtenons :

$$V_{sg} = K g(V_{sl}) \quad (9)$$

Pour le canal de diamètre 32 mm, à partir des courbes de la figure 11.1, pour chaque valeur de V_{sl} , nous avons déterminé la valeur correspondante de V_{sg} pour $\langle \alpha \rangle = 0,025; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$. Ces valeurs de $\langle \alpha \rangle$ correspondent au régime à bulles indépendantes (les résultats numériques figurent sur le tableau 5).

Nous avons tracé les courbes :

$$V_{sg} = g'(V_{sl}) \quad (\text{fig. 13})$$

Nous obtenons un faisceau de droites qui concourent au point - 20.

Donc pour $\langle \alpha \rangle$ constant et V_{sl} variable, on a :

$$V_{sg} = K (V_{sl} + 20) \quad (10)$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} = K$$

Le rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$ est donc uniquement fonction de $\langle \alpha \rangle$.

$$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} = H(\langle \alpha \rangle)$$

Ce qui peut encore s'écrire en prenant la fonction inverse :

$$\langle \alpha \rangle = F\left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}\right)$$

TABLEAU 4.1

Tube de diamètre 32 mm

 $V_{sl} = 0$

$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	Mg g/s
0,022	0,377	0,019	0,004
0,032	0,575	0,029	0,007
0,042	0,801	0,040	0,009
0,060	1,144	0,057	0,013
0,085	1,642	0,082	0,019
0,100	2,219	0,110	0,026
0,120	2,602	0,130	0,030
0,140	3,021	0,151	0,035
0,160	3,422	0,171	0,039
0,180	3,979	-	0,045
0,205	4,697	-	0,053
0,217	5,264	-	0,060
0,247	6,584	-	0,074
0,275	7,984	-	0,089
0,327	9,453	-	0,105
0,361	10,74	-	0,119
0,363	11,87	-	0,135
0,402	15,51	-	0,170
0,426	18,92	-	0,206
0,514	25,89	-	0,278
0,572	33,04	-	0,352
0,654	45,89	-	0,482
0,666	66,37	-	0,690
0,760	103,7	-	1,07
0,707	114,6	-	1,17
0,705	145,3	-	1,48
0,745	179,0	-	1,80
0,750	228,9	-	2,33
0,792	336,6	-	3,43

TABLEAU 4.1 (suite)

 $V_{sl} = 3,26$ cm/s

$\langle \alpha \rangle$	V_{sg} cm/s	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	M_g g/s	$10^3 \cdot \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,017	0,348	0,107	0,015	0,004	0,153
0,030	0,636	0,195	0,027	0,007	0,280
0,037	0,852	0,261	0,037	0,010	0,375
0,075	1,781	0,546	0,077	0,021	0,777
0,057	1,308	0,401	0,056	0,015	0,574
0,095	2,435	0,747	0,105	0,028	1,058
0,110	2,848	0,874	0,122	0,033	1,232
0,130	3,233	0,992	0,139	0,037	1,394
0,160	3,795	1,164	0,163	0,043	1,634
0,182	4,444	1,363	0,191	0,050	1,904
0,210	5,086	1,560	1,219	0,057	2,168
0,240	6,454	1,980		0,072	2,738
0,265	7,524	2,308		0,084	3,182
0,282	8,735	2,679		0,098	3,635
0,296	10,058	3,085		0,111	4,203
0,325	11,507	3,530		0,127	4,784
0,387	13,399	4,110		0,147	5,541
0,408	14,999	4,601		0,164	6,170
0,430	17,977	5,515		0,195	7,352
0,475	24,458	7,502		0,263	9,885
0,509	31,803	9,756		0,338	12,638
0,595	43,158	13,239		0,452	16,834
0,622	50,831	15,592		0,529	19,674
0,667	66,479	20,392		0,685	25,335
0,686	105,12	32,246		1,079	39,295
0,697	162,38	49,812		1,658	59,154
0,726	141,83	43,509		1,441	51,815
0,745	170,13	52,190		1,729	61,517
0,725	208,96	64,100		2,144	75,193
0,762	285,55	87,594		2,930	99,996
0,773	409,80	125,70		4,205	137,522
0,816	602,40	184,78		6,181	189,884
0,848	826,01	253,37		8,392	241,411
0,872	945,59	290,06		9,607	267,028

TABLEAU 4.1 (suite)

$V_{sl} = 5,79 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,020	0,471	0,081	0,018	0,005	0,115
0,025	0,662	0,114	0,026	0,008	0,161
0,032	0,881	0,152	0,034	0,010	0,215
0,050	1,330	0,230	0,052	0,015	0,324
0,085	2,466	0,426	0,096	0,028	0,595
0,065	1,799	0,311	0,070	0,020	0,436
0,097	2,852	0,493	0,111	0,032	0,686
0,110	3,232	0,558	0,125	0,036	0,776
0,135	3,789	0,654	0,147	0,042	0,906
0,157	4,409	0,762	0,171	0,049	1,051
0,180	5,028	0,868	0,195	0,056	1,193
0,220	6,304	1,089	0,244	0,070	1,489
0,260	7,585	1,310		0,084	1,783
0,290	9,013	1,557		0,099	2,114
0,305	10,336	1,785		0,113	2,412
0,322	11,810	2,040		0,129	2,743
0,355	13,441	2,321		0,146	3,106
0,362	15,110	2,610		0,163	3,475
0,375	18,310	3,162		0,197	4,189
0,447	24,850	4,292		0,263	5,598
0,532	32,300	5,579		0,339	7,196
0,550	43,545	7,521		0,451	9,542
0,621	67,567	11,670		0,689	14,520
0,635	107,97	18,648		1,090	22,784
0,702	164,18	28,357		1,658	34,240
0,721	143,25	24,742		1,447	30,006
0,715	172,15	29,733		1,739	35,842
0,747	252,41	43,595		2,549	51,689
0,760	328,64	56,760		3,319	66,264
0,782	417,49	72,106		4,216	82,697
0,792	611,38	105,59		6,175	116,625
0,825	834,19	144,07		8,384	152,004

TABLEAU 4.1 (suite)

$V_{sl} = 28,5 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,020	0,881	0,031	0,018	0,010	0,044
0,030	1,334	0,047	0,028	0,015	0,067
0,040	1,803	0,063	0,037	0,021	0,091
0,045	2,499	0,088	0,052	0,029	0,126
0,050	3,272	0,115	0,067	0,038	0,164
0,072	3,816	0,134	0,079	0,044	0,191
0,082	4,440	0,156	0,092	0,051	0,222
0,095	5,032	0,177	0,104	0,058	0,251
0,115	6,288	0,221	0,130	0,072	0,312
0,140	7,572	0,266	0,156	0,086	0,375
0,165	8,980	0,315	0,185	0,102	0,443
0,190	10,318	0,362	0,213	0,117	0,507
0,210	11,533	0,405		0,130	0,564
0,240	13,098	0,460		0,147	0,639
0,260	14,533	0,510		0,163	0,708
0,300	17,708	0,622		0,197	0,855
0,350	20,911	0,734		0,231	1,005
0,372	24,379	0,856		0,269	1,171
0,400	31,884	1,120		0,349	1,518
0,429	44,084	1,548		0,478	2,078
0,514	69,575	2,443		0,748	3,246
0,526	84,348	2,962		0,899	3,897
0,562	105,28	3,697		1,117	4,837
0,596	106,61	3,743		1,127	4,884
0,614	123,37	4,332		1,302	5,637
0,600	129,86	4,560		1,371	5,932
0,651	176,91	6,212		1,867	8,064
0,647	224,19	7,872		2,355	10,149
0,721	321,32	11,28		3,392	14,550
0,729	438,44	15,39		4,628	19,749
0,765	693,43	24,34		7,320	30,880

TABLEAU 4.1 (suite)

$V_{sl} = 46,4 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,025	1,332	0,029	0,020	0,015	0,041
0,030	1,808	0,039	0,027	0,021	0,056
0,042	2,932	0,063	0,044	0,034	0,090
0,057	3,853	0,083	0,058	0,044	0,118
0,075	5,084	0,110	0,077	0,058	0,156
0,107	7,596	0,164	0,114	0,086	0,231
0,147	10,351	0,223	0,156	0,117	0,313
0,185	13,314	0,287	0,200	0,150	0,401
0,205	14,866	0,320		0,167	0,446
0,235	18,240	0,393		0,204	0,545
0,280	21,796	0,469		0,242	0,646
0,310	25,566	0,551		0,283	0,756
0,325	28,592	0,616		0,316	0,843
0,347	32,318	0,696		0,356	0,949
0,360	37,283	0,803		0,410	1,093
0,395	44,345	0,955		0,485	1,294
0,395	50,207	1,081		0,547	1,458
0,435	66,107	1,424		0,716	1,910
0,485	83,693	1,803		0,899	2,394
0,522	104,25	2,245		1,114	2,967
0,535	115,24	2,482		1,232	3,279
0,561	128,35	2,764		1,372	3,650
0,560	139,79	3,011		1,487	3,956
0,581	154,61	3,330		1,640	4,362
0,614	188,39	4,058		1,995	5,300
0,337	242,60	5,225		2,569	6,814
0,645	289,50	6,235		3,080	8,159
0,652	363,98	7,839		3,890	10,283
0,734	496,78	10,70		5,359	14,110

TABLEAU 4.1 (suite)

$V_{sl} = 86,1 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,020	1,363	0,016	0,013	0,016	0,023
0,025	2,005	0,023	0,019	0,023	0,034
0,035	3,324	0,039	0,031	0,039	0,056
0,050	5,155	0,060	0,049	0,060	0,086
0,075	7,893	0,092	0,074	0,092	0,132
0,095	10,215	0,119	0,096	0,118	0,171
0,120	13,385	0,155	0,126	0,155	0,222
0,135	14,899	0,173	0,140	0,172	0,248
0,155	18,358	0,213	0,173	0,211	0,304
0,190	22,121	0,257	0,208	0,254	0,366
0,212	26,303	0,305	0,248	0,300	0,432
0,235	30,696	0,356		0,350	0,503
0,235	31,250	0,363		0,356	0,513
0,265	35,919	0,417		0,408	0,588
0,300	42,629	0,495		0,482	0,693
0,327	49,322	0,573		0,557	0,802
0,365	64,687	0,751		0,724	1,042
0,390	81,668	0,948		0,910	1,309
0,427	101,58	1,180		1,127	1,621
0,409	97,471	1,132		1,082	1,555
0,431	110,28	1,281		1,224	1,759
0,446	123,49	1,434		1,371	1,970
0,470	136,99	1,591		1,520	2,185
0,487	166,23	1,930		1,845	2,650
0,519	204,29	2,372		2,277	3,269
0,591	275,64	3,201		3,086	4,425
0,619	349,85	4,063		3,952	5,659
0,640	442,68	5,141		5,001	7,149

TABLEAU 4.1 (suite)

$V_{sl} = 120 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,025	2,841	0,024	0,020	0,034	0,035
0,037	4,344	0,036	0,031	0,051	0,053
0,057	7,337	0,061	0,052	0,087	0,089
0,075	9,353	0,082	0,070	0,117	0,120
0,092	12,745	0,106	0,091	0,151	0,155
0,115	17,240	0,143	0,123	0,203	0,209
0,137	20,447	0,170	0,145	0,241	0,248
0,155	23,617	0,196	0,168	0,278	0,285
0,170	27,050	0,224	0,192	0,318	0,327
0,187	30,540	0,253	0,217	0,358	0,368
0,210	35,157	0,292		0,412	0,424
0,235	41,220	0,342		0,483	0,496
0,265	48,071	0,399		0,562	0,577
0,315	62,439	0,518		0,726	0,747
0,327	78,285	0,649		0,907	0,932
0,349	96,505	0,801		1,113	1,144
0,340	95,550	0,793		1,102	1,132
0,367	107,57	0,892		1,241	1,275
0,386	120,80	1,002		1,393	1,431
0,382	133,26	1,105		1,544	1,585
0,437	160,64	1,333		1,861	1,910
0,472	204,32	1,695		2,387	2,449
0,522	264,17	2,191		3,126	3,205
0,532	337,11	2,796		4,022	4,120
0,586	375,74	3,117		4,520	4,628
0,616	458,27	3,802		5,581	5,708
0,619	535,90	4,445		5,712	6,857
0,648	621,81	5,158		7,912	8,072
0,668	703,02	5,832		9,120	9,293

TABLEAU 4.1 (suite)

$V_{sl} = 155 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,025	3,240	0,021	0,019	0,039	0,031
0,035	4,940	0,032	0,028	0,059	0,047
0,050	7,358	0,047	0,042	0,088	0,070
0,065	9,915	0,064	0,057	0,116	0,095
0,080	12,781	0,082	0,073	0,153	0,122
0,105	17,230	0,111	0,098	0,206	0,165
0,135	23,682	0,153	0,135	0,283	0,226
0,150	26,949	0,174	0,154	0,322	0,257
0,165	30,251	0,195	0,173	0,361	0,289
0,185	34,760	0,224	0,199	0,415	0,332
0,200	39,525	0,255		0,472	0,378
0,220	45,541	0,294		0,544	0,435
0,259	57,636	0,372		0,688	0,550
0,290	69,239	0,447		0,827	0,661
0,292	81,208	0,524		0,970	0,775
0,300	94,008	0,607		1,123	0,897
0,325	106,28	0,686		1,269	1,015
0,340	118,90	0,767		1,420	1,135
0,357	131,51	0,848		1,577	1,260
0,385	157,40	1,016		1,903	1,520
0,420	193,98	1,252		2,355	1,881
0,461	259,32	1,673		3,226	2,574
0,495	324,23	2,092		4,098	3,267
0,560	445,09	2,872		5,802	4,620
0,579	520,00	3,361		6,944	5,525
0,615	597,13	3,852		8,079	6,422
0,607	668,39	4,312		9,309	7,392

TABLEAU 4.1 (suite)

 $V_{sl} = 205 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}+20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,025	4,313	0,021	0,019	0,053	0,032
0,040	7,245	0,035	0,032	0,089	0,054
0,050	9,717	0,047	0,043	0,120	0,072
0,060	12,517	0,061	0,056	0,154	0,093
0,080	16,776	0,082	0,075	0,207	0,125
0,100	22,872	0,112	0,102	0,283	0,171
0,125	29,216	0,142	0,130	0,361	0,218
0,140	33,418	0,163	0,148	0,414	0,250
0,155	38,966	0,190	0,173	0,483	0,292
0,175	44,770	0,218	0,199	0,555	0,336
0,207	56,514	0,276		0,705	0,426
0,237	67,741	0,330		0,849	0,513
0,265	79,462	0,387		1,000	0,604
0,280	91,570	0,447		1,157	0,699
0,292	103,09	0,503		1,307	0,790
0,305	115,12	0,561		1,468	0,887
0,315	125,07	0,610		1,604	0,969
0,337	150,58	0,734		1,954	1,180
0,360	183,96	0,897		2,424	1,463
0,420	247,23	1,206		3,330	2,010
0,447	307,67	1,500		4,266	2,573
0,500	408,70	1,993		5,828	3,512
0,515	450,19	2,195		6,687	4,027

TABLEAU 4.1 (suite)

 $V_{sl} = 252 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}+20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,022	4,829	0,019	0,018	0,061	0,030
0,035	8,503	0,034	0,031	0,107	0,053
0,047	12,461	0,049	0,046	0,157	0,077
0,065	16,689	0,066	0,061	0,211	0,104
0,085	23,045	0,091	0,085	0,292	0,143
0,105	29,800	0,118	0,109	0,378	0,186
0,115	34,244	0,136	0,126	0,435	0,214
0,130	39,984	0,159	0,147	0,510	0,251
0,150	46,536	0,185	0,171	0,596	0,293
0,172	55,881	0,222		0,722	0,355
0,195	66,905	0,265		0,874	0,430
0,222	78,001	0,309		1,027	0,505
0,242	89,645	0,356		1,193	0,586
0,262	100,57	0,399		1,354	0,665
0,277	112,13	0,445		1,520	0,747
0,287	123,95	0,492		1,683	0,832
0,314	148,41	0,589		2,041	1,003
0,340	179,97	0,714		2,547	1,251
0,385	240,01	0,952		3,492	1,714
0,420	297,86	1,181		4,496	2,206
0,470	389,57	1,545		6,170	3,025
0,480	446,78	1,772		7,342	3,597

TABLEAU 4.1 (suite)

$$V_{sl} = 311 \text{ cm/s}$$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}+20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g+M_l}$
0,020	5,985	0,019	0,018	0,079	0,032
0,035	10,851	0,035	0,033	0,144	0,057
0,050	16,453	0,053	0,050	0,219	0,087
0,067	22,485	0,072	0,068	0,300	0,120
0,082	28,665	0,092	0,087	0,385	0,153
0,090	32,713	0,105	0,099	0,440	0,175
0,105	37,917	0,122	0,114	0,513	0,204
0,115	43,365	0,139	0,131	0,591	0,236
0,135	54,342	0,175	0,164	0,749	0,290
0,160	65,056	0,209		0,906	0,361
0,180	75,982	0,244		1,066	0,425
0,200	86,816	0,279		1,235	0,492
0,220	97,497	0,313		1,401	0,558
0,235	107,76	0,346		1,566	0,623
0,250	118,48	0,381		1,739	0,692
0,275	140,33	0,451		2,108	0,839
0,310	171,74	0,552		2,648	1,054
0,350	227,11	0,730		3,682	1,465
0,385	282,36	0,907		4,774	1,898
0,435	366,50	1,177		6,560	2,607
0,470	421,81	1,355		7,843	3,115

TABLEAU 4.2

Tube de diamètre 20 mm

$V_{sl} = 0,39 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,036	1,194	0,142	0,042	0,065	0,201
0,062	1,881	0,224	0,066	0,008	0,316
0,094	2,776	0,331	0,098	0,012	0,463
0,139	4,583	0,546	0,161	0,020	0,760
0,162	5,610	0,669	0,198	0,024	0,923
0,198	6,837	0,815		0,030	1,121
0,221	7,786	0,928		0,034	1,272
0,263	9,638	1,149		0,041	1,567
0,298	11,016	1,313		0,047	1,785
0,315	11,501	1,371		0,049	1,857
0,337	13,004	1,550		0,055	2,090
0,376	16,565	1,974		0,070	2,639
0,418	20,325	2,423		0,085	3,218
0,461	24,174	2,881		0,101	3,802
0,521	32,260	3,845		0,133	5,026
0,533	37,204	4,434		0,151	5,696
0,531	40,766	4,859		0,165	6,231
0,595	51,430	6,130		0,206	7,764
0,632	72,481	8,639		0,287	10,761
0,714	92,041	10,97		0,362	13,560
0,737	129,36	15,41		0,507	18,862
0,727	161,55	19,25		0,633	23,445
0,789	203,35	24,23		0,797	29,335
0,781	249,54	29,74		0,977	35,720

TABLEAU 4.2 (suite)

$V_{sl} = 14,8 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,060	2,317	0,156	0,066	0,010	0,214
0,094	3,470	0,233	0,099	0,015	0,321
0,140	5,602	0,374	0,161	0,025	0,531
0,167	6,603	0,424	0,189	0,029	0,616
0,187	7,666	0,515	0,219	0,033	0,701
0,214	8,425	0,566	0,241	0,037	0,784
0,252	9,919	0,667		0,043	0,912
0,284	11,60	0,780		0,050	1,07
0,336	13,39	0,900		0,057	1,22
0,400	17,00	1,142		0,072	1,53
0,433	20,69	1,390		0,087	1,85
0,457	24,59	1,652		0,103	2,20
0,476	35,21	2,366		0,147	3,13
0,542	35,81	2,407		0,149	3,17
0,568	43,37	2,914		0,180	3,83
0,664	62,96	4,231		0,257	5,46
0,668	73,26	4,924		0,297	6,31
0,672	97,28	6,537		0,389	8,24
0,715	135,5	9,107		0,541	11,4
0,726	175,0	11,76		0,692	14,6
0,758	210,2	14,13		0,835	17,6
0,747	262,0	17,61		1,05	21,9
0,766	283,9	19,08		1,14	23,8
0,759	311,1	20,91		1,25	26,0
0,780	322,0	21,64		1,29	26,9
0,766	390,5	26,24		1,57	32,4
0,749	346,1	23,26		1,39	28,8
0,784	418,1	28,10		1,68	34,6
0,776	472,1	31,72		1,89	38,9
0,789	513,4	34,50		2,06	42,2
0,852	1000	67,75		4,06	79,9
0,882	1331	89,44		5,44	104,2

TABLEAU 4.2 (suite)

$V_{sl} = 73,1 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,025	2,280	0,031	0,024	0,010	0,041
0,039	3,383	0,046	0,036	0,015	0,065
0,069	5,897	0,081	0,063	0,026	0,114
0,089	6,901	0,094	0,074	0,030	0,132
0,109	9,061	0,124	0,097	0,040	0,174
0,125	10,454	0,143	0,112	0,046	0,200
0,160	13,808	0,189	0,148	0,060	0,263
0,184	17,149	0,235	0,184	0,075	0,326
0,208	20,288	0,277	0,218	0,089	0,387
0,249	24,015	0,328		0,104	0,452
0,283	30,526	0,417		0,132	0,573
0,367	40,541	0,554		0,174	0,757
0,464	60,546	0,828		0,257	1,117
0,494	79,834	1,092		0,342	1,486
0,494	93,895	1,284		0,402	1,746
0,506	124,38	1,701		0,528	2,295
0,566	164,49	2,250		0,699	3,034
0,578	205,74	2,814		0,876	3,800
0,594	256,03	3,502		1,100	4,768
0,626	314,87	4,306		1,366	5,911
0,665	378,57	5,177		1,657	7,162
0,643	308,58	4,220		1,338	5,793
0,652	345,06	4,719		1,502	6,496
0,673	418,75	5,727		1,814	7,836
0,688	469,85	6,426		2,075	8,952
0,691	478,10	6,539		2,282	9,835
0,742	940,62	12,88		4,478	19,123
0,795	1458,5	19,94		7,598	32,018
0,813	1741,6	23,81		9,399	39,309

TABLEAU 4.2 (suite)

$V_{sl} = 119 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{L_g}{M_g + M_1}$
0,023	2,731	0,023	0,020	0,010	0,028
0,040	6,252	0,052	0,045	0,024	0,065
0,065	9,267	0,078	0,067	0,038	0,102
0,098	13,142	0,110	0,094	0,050	0,159
0,121	16,459	0,138	0,118	0,075	0,201
0,166	23,782	0,200	0,171	0,108	0,290
0,204	30,566	0,256	0,220	0,139	0,372
0,256	39,622	0,332	0,205	0,178	0,474
0,274	44,464	0,373		0,201	0,537
0,307	52,206	0,433		0,237	0,631
0,380	71,886	0,603		0,321	0,858
0,400	88,771	0,745		0,403	1,075
0,396	121,51	1,020		0,552	1,471
0,465	158,93	1,334		0,725	1,932
0,511	199,92	1,677		0,902	2,403
0,517	244,72	2,053		1,135	3,023
0,570	295,27	2,478		1,391	3,702
0,602	355,25	2,981		1,667	4,433
0,570	297,46	2,496		1,371	3,648
0,622	329,53	2,765		1,545	4,109
0,590	388,77	3,262		1,880	4,997
0,617	447,26	3,753		2,125	5,644
0,638	480,53	4,032		2,385	6,330
0,700	889,19	7,461		4,961	13,076
0,762	1330,4	11,16		8,433	22,026

TABLEAU 4.2 (suite)

 $V_{sl} = 221 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,032	6,435	0,029	0,027	0,025	0,035
0,040	9,285	0,042	0,039	0,038	0,055
0,068	14,582	0,066	0,060	0,060	0,086
0,082	18,121	0,082	0,075	0,076	0,109
0,102	23,213	0,105	0,096	0,108	0,155
0,131	32,266	0,146	0,134	0,138	0,196
0,172	45,584	0,206	0,169	0,209	0,301
0,175	50,622	0,229	0,210	0,250	0,360
0,223	56,886	0,257	0,236	0,287	0,414
0,268	81,035	0,367		0,408	0,586
0,299	98,202	0,445		0,502	0,723
0,325	127,28	0,576		0,660	0,950
0,337	147,28	0,666		0,800	1,151
0,379	186,15	0,842		0,994	1,429
0,422	224,93	1,018		1,234	1,774
0,414	220,69	0,998		1,243	1,787
0,429	248,16	1,123		1,418	2,038
0,451	275,32	1,246		1,595	2,291
0,461	302,40	1,368		1,780	2,557
0,506	360,77	1,632		2,172	3,117
0,506	404,36	1,829		2,498	3,584
0,537	434,35	1,965		2,726	3,910
0,586	632,035	2,859		4,359	6,237

TABLEAU 4.2 (suite)

 $V_{sg} = 309 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,024	7,789	0,025	0,024	0,041	0,042
0,034	11,890	0,038	0,036	0,064	0,066
0,042	14,821	0,048	0,045	0,080	0,082
0,055	20,857	0,067	0,063	0,113	0,116
0,077	26,674	0,086	0,081	0,146	0,150
0,091	33,655	0,109	0,102	0,185	0,190
0,112	40,863	0,152	0,124	0,226	0,233
0,132	48,866	0,158	0,148	0,269	0,276
0,160	65,788	0,213	0,200	0,375	0,386
0,202	81,606	0,264	0,248	0,476	0,489
0,245	107,99	0,349		0,659	0,677
0,280	136,18	0,440		0,857	0,891
0,313	167,78	0,542		1,076	1,106
0,327	174,75	0,565		1,173	1,205
0,338	198,50	0,641		1,365	1,402
0,354	223,42	0,722		1,566	1,608
0,386	247,12	0,799		1,766	1,814
0,392	271,48	0,877		1,963	2,015
0,412	320,68	1,034		2,416	2,478
0,444	361,12	1,167		2,808	2,680
0,456	389,44	1,258		3,051	3,129

TABLEAU 4.2 (suite)

$$V_{sl} = 397 \text{ cm/s}$$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,022	11,760	0,030	0,020	0,069	0,055
0,030	14,558	0,037	0,035	0,085	0,066
0,042	20,380	0,051	0,049	0,120	0,096
0,057	26,075	0,066	0,062	0,156	0,125
0,086	39,489	0,099	0,094	0,242	0,193
0,099	47,457	0,119	0,114	0,292	0,234
0,127	63,753	0,160	0,153	0,405	0,324
0,163	78,607	0,198	0,188	0,515	0,411
0,195	99,507	0,250	0,238	0,679	0,543
0,214	123,20	0,310		0,878	0,846
0,255	146,91	0,369		1,059	0,991
0,277	171,64	0,431		1,239	1,156
0,302	193,87	0,487		1,447	1,156
0,324	210,56	0,529		1,719	1,373
0,328	232,08	0,583		1,937	1,547

TABLEAU 4.3

Tube de diamètre 16 mm

 $V_{sl} = 13,06 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,049	1,960	0,150	0,059	0,006	0,216
0,060	2,365	0,181	0,072	0,007	0,260
0,078	2,828	0,217	0,086	0,008	0,309
0,093	3,375	0,258	0,102	0,010	0,368
0,105	3,549	0,272	0,107	0,010	0,385
0,132	4,576	0,350	0,138	0,013	0,495
0,160	5,619	0,430	0,170	0,016	0,606
0,179	6,746	0,517	0,204	0,019	0,725
0,228	9,418	0,721	0,285	0,026	1,004
0,258	10,917	0,836		0,031	1,159
0,285	12,779	0,978		0,036	1,350
0,326	14,347	1,099		0,040	1,509
0,350	16,037	1,274		0,046	1,742
0,398	19,461	1,490		0,053	2,028
0,425	21,658	1,658		0,059	2,252
0,450	26,476	2,027		0,072	2,732
0,525	31,717	2,429		0,085	3,227
0,527	38,680	2,962		0,103	3,915
0,591	42,439	3,250		0,112	4,255
0,593	49,644	3,801		0,131	4,964
0,632	64,864	4,967		0,170	6,428
0,668	85,729	6,564		0,204	7,691
0,668	73,068	5,978		0,204	7,691
0,718	93,023	7,582		0,257	9,690
0,711	108,09	8,277		0,281	10,568
0,750	156,11	11,95		0,404	15,121
0,741	167,09	14,32		0,484	18,067
0,797	261,69	20,03		0,677	25,090
0,779	410,66	31,44		1,067	38,995
0,787	589,97	45,17		1,533	55,085
0,789	586,50	44,90		1,524	54,778
0,821	753,58	57,70		1,958	63,301
0,834	864,84	66,22		2,252	78,865
0,857	1075,8	82,38		2,809	96,504

TABLEAU 4.3 (suite)

 $V_{sl} = 23,22 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,020	1,085	0,047	0,025	0,003	0,067
0,030	1,899	0,082	0,044	0,006	0,118
0,050	2,700	0,116	0,062	0,008	0,167
0,075	3,675	0,158	0,085	0,011	0,227
0,095	4,703	0,203	0,109	0,014	0,289
0,115	5,668	0,244	0,131	0,016	0,348
0,175	9,575	0,412	0,222	0,027	0,583
0,210	10,854	0,467	0,251	0,031	0,656
0,237	12,776	0,550	0,296	0,036	0,770
0,263	13,844	0,596	0,320	0,039	0,829
0,309	16,649	0,717		0,047	0,995
0,342	18,967	0,817		0,053	1,124
0,362	21,170	0,912		0,059	1,254
0,397	26,262	1,131		0,073	1,549
0,429	31,428	1,353		0,086	1,844
0,470	38,471	1,657		0,105	2,247
0,494	46,638	1,879		0,119	2,536
0,522	56,321	2,425		0,151	3,226
0,611	76,168	3,280		0,202	4,298
0,671	99,776	4,297		0,264	5,623
0,655	131,25	5,652		0,346	7,350
0,684	157,01	6,761		0,412	8,739
0,709	222,32	9,574		0,585	12,352
0,755	335,35	14,44		0,885	18,567
0,746	481,65	20,74		1,274	26,525
0,775	701,02	30,18		1,867	38,386
0,794	711,78	30,65		1,896	38,952
0,816	908,00	39,10		2,429	49,380
0,870	1442,1	62,10		3,966	78,164
0,884	1484,1	63,91		4,081	80,259

TABLEAU 4.3 (suite)

$V_{sl} = 71,58 \text{ cm/s}$

$\langle x \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,027	2,577	0,036	0,028	0,008	0,053
0,037	3,467	0,048	0,038	0,010	0,071
0,057	5,391	0,075	0,059	0,016	0,110
0,077	7,366	0,103	0,080	0,022	0,151
0,115	9,531	0,133	0,104	0,028	0,194
0,142	11,070	0,155	0,121	0,032	0,225
0,152	12,622	0,176	0,138	0,037	0,255
0,175	14,891	0,208	0,163	0,043	0,300
0,185	17,362	0,243	0,190	0,050	0,349
0,202	19,777	0,276	0,216	0,057	0,398
0,240	25,086	0,350	0,274	0,073	0,503
0,277	29,955	0,418		0,086	0,598
0,312	35,397	0,495		0,101	0,703
0,342	40,679	0,568		0,116	0,804
0,380	46,719	0,653		0,133	0,924
0,400	52,745	0,737		0,150	1,038
0,425	58,896	0,823		0,167	1,156
0,465	71,362	0,997		0,202	1,398
0,500	84,088	1,175		0,237	1,640
0,535	100,25	1,401		0,284	1,963
0,545	110,08	1,538		0,310	2,146
0,540	141,39	1,975		0,395	2,730
0,585	196,46	2,745		0,546	3,773
0,640	291,39	4,071		0,817	5,635
0,665	427,91	5,978		1,221	8,398
0,695	600,84	8,394		1,744	11,953
0,717	591,15	8,259		1,731	11,862
0,730	724,74	10,12		2,158	14,745
0,755	981,11	13,70		2,994	20,342
0,785	1247,1	17,42		3,930	26,529
0,825	1704,4	23,81		5,708	38,078

TABLEAU 4.3 (suite)

$V_{sl} = 114,1 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,023	2,961	0,026	0,022	0,009	0,038
0,035	4,305	0,038	0,032	0,013	0,056
0,050	6,171	0,054	0,046	0,018	0,080
0,078	10,244	0,090	0,076	0,030	0,132
0,088	11,688	0,102	0,087	0,034	0,150
0,098	13,330	0,117	0,099	0,039	0,171
0,118	15,572	0,137	0,116	0,046	0,199
0,145	19,876	0,174	0,148	0,058	0,254
0,172	24,626	0,216	0,184	0,072	0,315
0,202	30,178	0,265	0,225	0,089	0,386
0,228	35,076	0,308	0,262	0,103	0,447
0,255	39,925	0,350	0,298	0,117	0,507
0,277	45,443	0,398	0,339	0,133	0,577
0,305	51,629	0,453	0,385	0,150	0,654
0,317	57,633	0,505		0,168	0,730
0,355	71,839	0,630		0,209	0,910
0,395	82,499	0,723		0,240	1,045
0,412	95,355	0,836		0,278	1,209
0,432	108,43	0,951		0,316	1,376
0,455	121,45	1,065		0,355	1,545
0,475	139,64	1,224		0,407	1,768
0,500	166,75	1,462		0,483	2,098
0,544	236,86	2,077		0,691	2,998
0,595	360,95	3,165		1,098	4,749
0,633	517,05	4,533		1,633	7,061
0,629	489,75	4,294		1,541	6,665
0,690	714,45	6,264		2,345	10,106
0,744	940,76	8,248		3,273	14,048
0,714	942,40	8,262		3,278	14,072
0,744	1173,6	10,29		4,314	18,435
0,779	1563,9	13,71		6,287	26,640
0,789	1802,1	15,80		7,687	32,383

TABLEAU 4.3 (suite)

$V_{sl} = 185,9 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}+20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,015	2,986	0,016	0,014	0,009	0,025
0,030	5,320	0,029	0,026	0,017	0,045
0,052	8,720	0,047	0,042	0,027	0,073
0,067	10,884	0,059	0,053	0,034	0,091
0,082	15,315	0,082	0,074	0,048	0,128
0,092	19,430	0,104	0,094	0,061	0,163
0,112	24,305	0,131	0,118	0,076	0,204
0,132	29,669	0,160	0,144	0,093	0,249
0,144	34,557	0,186	0,168	0,109	0,290
0,172	43,834	0,236	0,213	0,138	0,368
0,205	55,011	0,296	0,267	0,174	0,465
0,230	65,610	0,353	0,319	0,208	0,555
0,260	76,283	0,410	0,370	0,243	0,649
0,285	88,994	0,479		0,284	0,758
0,305	101,41	0,545		0,326	0,870
0,327	112,21	0,603		0,361	0,963
0,350	128,58	0,692		0,420	1,120
0,375	151,40	0,814		0,495	1,320
0,396	176,14	0,947		0,577	1,539
0,446	228,22	1,227		0,758	2,046
0,492	284,10	1,528		0,977	2,604
0,514	341,95	1,839		1,210	3,220
0,551	408,87	2,199		1,477	3,928
0,535	371,87	2,000		1,343	3,574
0,540	418,51	2,251		1,527	4,061
0,554	460,10	2,474		1,707	4,539
0,576	543,59	2,924		2,084	5,536
0,620	656,38	3,530		2,655	7,040
0,635	640,41	4,520		3,722	9,842
0,646	961,05	5,169		4,280	11,301
0,682	1059,2	5,589		4,937	13,013

TABLEAU 4.3 (suite)

$V_{sl} = 274,3$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}+20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_l}$
0,025	6,102	0,022	0,021	0,021	0,039
0,032	8,985	0,033	0,031	0,031	0,057
0,040	11,627	0,042	0,040	0,041	0,074
0,050	15,700	0,057	0,053	0,055	0,100
0,067	22,026	0,080	0,075	0,077	0,140
0,077	26,313	0,096	0,089	0,093	0,168
0,092	30,384	0,112	0,105	0,109	0,198
0,102	35,049	0,128	0,119	0,124	0,225
0,115	39,752	0,145	0,135	0,141	0,256
0,125	45,455	0,166	0,154	0,162	0,293
0,135	50,452	0,184	0,171	0,179	0,325
0,157	60,866	0,222	0,207	0,218	0,394
0,200	83,457	0,304		0,302	0,546
0,237	107,41	0,392		0,393	0,710
0,260	122,74	0,447		0,455	0,823
0,285	142,84	0,521		0,536	0,970
0,300	165,36	0,603		0,625	1,130
0,355	211,33	0,770		0,825	1,491
0,385	256,50	0,935		1,039	1,878
0,430	307,92	1,122		1,286	2,322
0,450	360,77	1,315		1,551	2,800
0,461	356,36	1,299		1,523	2,750
0,477	395,84	1,443		1,722	3,107
0,505	433,34	1,580		1,938	3,497
0,516	509,40	1,857		2,379	4,289
0,537	618,47	2,255		3,027	5,449
0,570	704,53	2,568		3,622	6,515
0,607	790,11	2,880		4,258	7,649

TABLEAU 4.3 (suite)

$V_{sl} = 344,8 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,017	7,532	0,022	0,021	0,028	0,041
0,030	11,454	0,033	0,031	0,043	0,063
0,037	15,278	0,044	0,042	0,058	0,084
0,052	21,409	0,062	0,059	0,082	0,118
0,070	30,015	0,087	0,082	0,116	0,167
0,090	38,506	0,112	0,106	0,150	0,216
0,115	48,412	0,140	0,133	0,191	0,275
0,125	58,062	0,168	0,159	0,232	0,335
0,160	79,126	0,229	0,217	0,324	0,466
0,180	90,989	0,264	0,249	0,380	0,547
0,192	102,20	0,296	0,280	0,429	0,618
0,215	116,61	0,338	0,320	0,501	0,721
0,230	133,70	0,388		0,585	0,842
0,261	154,64	0,448		0,688	0,990
0,302	197,80	0,574		0,909	1,308
0,337	240,26	0,697		1,149	1,652
0,360	248,64	0,721		1,248	1,793
0,380	285,80	0,829		1,491	2,142
0,396	318,48	0,924		1,693	2,432
0,416	349,52	1,014		1,901	2,730
0,434	382,53	1,109		2,137	3,068
0,455	449,87	1,305		2,591	3,718
0,495	554,24	1,607		3,385	4,851

TABLEAU 4.3 (suite)

$V_{sl} = 395 \text{ cm/s}$

$\langle \alpha \rangle$	$V_{sg} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$	$\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$	$M_g \text{ g/s}$	$10^3 \frac{M_g}{M_g + M_1}$
0,010	7,633	0,019	0,018	0,031	0,038
0,017	10,201	0,026	0,025	0,041	0,052
0,027	13,154	0,033	0,032	0,053	0,067
0,037	17,023	0,043	0,041	0,070	0,088
0,052	25,182	0,064	0,061	0,104	0,130
0,070	33,459	0,085	0,080	0,139	0,174
0,085	43,107	0,109	0,104	0,180	0,226
0,110	57,323	0,145	0,138	0,243	0,305
0,142	78,648	0,199	0,189	0,339	0,425
0,160	89,439	0,226	0,215	0,391	0,490
0,180	99,935	0,253	0,240	0,441	0,553
0,195	113,35	0,286		0,508	0,637
0,212	130,70	0,330		0,596	0,747
0,237	149,28	0,377		0,688	0,862
0,267	184,68	0,467		0,887	1,112
0,295	218,75	0,553		1,094	1,371
0,325	253,16	0,640		1,298	1,626
0,340	286,17	0,723		1,531	1,917
0,372	320,01	0,809		1,744	2,183
0,390	352,79	0,891		1,975	2,472
0,405	385,94	0,975		2,217	2,775

$$V_{SI} = 482,8 \text{ cm/s}$$

TABLEAU 4.3 (suite)

$\langle \alpha \rangle$	$V_{SI} \text{ cm/s}$	$\frac{V_{SI}}{V_{SR}}$	$\frac{V_{SI} + 20}{V_{SR}}$	$M_E \text{ E/s}$	$10^3 \frac{M_E}{M_E + M_I}$
0,012	8,973	0,019	0,018	0,042	0,043
0,025	14,989	0,031	0,030	0,071	0,073
0,040	24,221	0,050	0,048	0,117	0,120
0,050	31,757	0,066	0,063	0,157	0,161
0,062	40,602	0,084	0,081	0,205	0,211
0,087	53,707	0,111	0,107	0,277	0,285
0,115	73,158	0,152	0,146	0,393	0,404
0,130	82,327	0,171	0,164	0,451	0,464
0,152	103,44	0,214	0,206	0,594	0,610
0,175	118,95	0,246	0,237	0,687	0,706
0,190	135,00	0,280	0,269	0,796	0,819
0,220	167,89	0,348		1,028	1,056
0,247	198,68	0,412		1,256	1,290
0,272	228,02	0,472		1,498	1,538

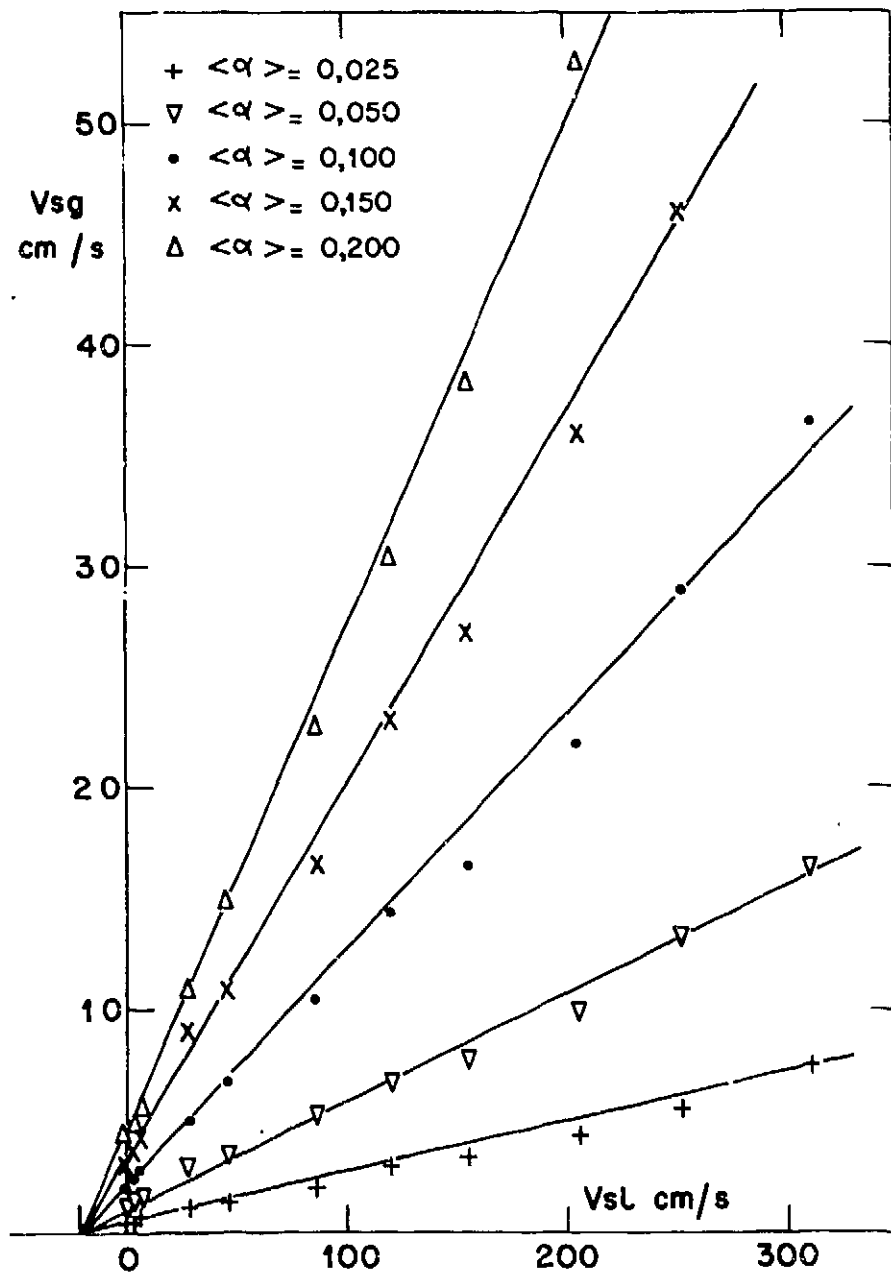


Figure n° 13 - Vitesse superficielle de la phase gazeuse en fonction de la vitesse superficielle de la phase liquide à $\langle \alpha \rangle$ constant - Tube de diamètre 32 mm.

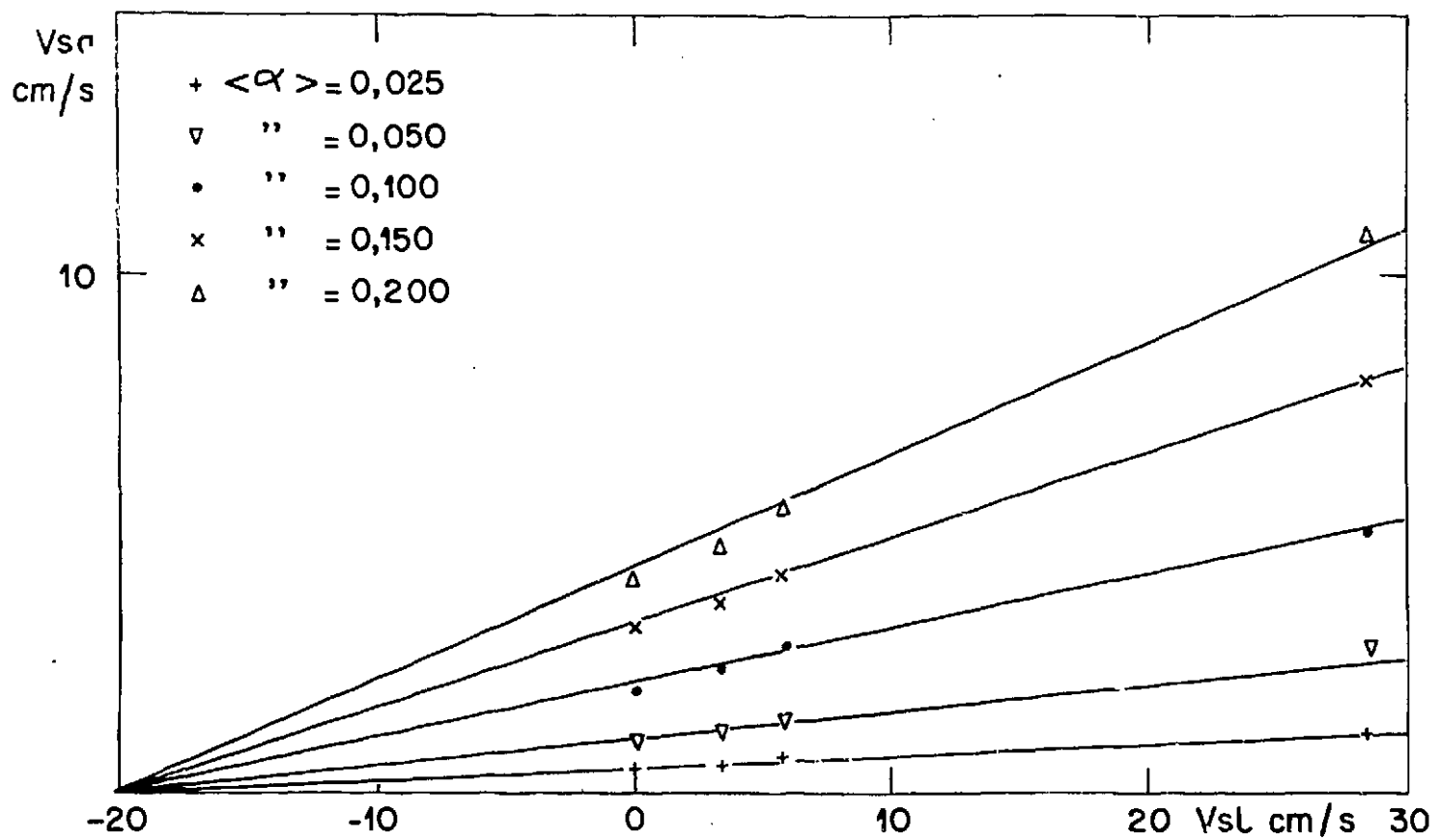


Figure n° 13 bis - Vitesse superficielle de la phase gazeuse en fonction de la vitesse superficielle de la liquide à $\langle \alpha \rangle$ constant. Tube de diamètre 32 mm (fig. 13 agrandie au voisinage de l'origine).

TABLEAU 5

V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle = 0,025$ V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle = 0,050$ V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle = 0,100$ V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle = 0,150$ V_{sg} cm/s	$\langle \alpha \rangle = 0,200$ V_{sg} cm/s
0	0,45	0,95	2,0	3,20	4,30
3,26	0,54	1,12	2,40	3,65	4,90
5,70	0,67	1,34	2,85	4,25	5,70
28,5	1,16	2,70	5,00	8,00	11,0
46,4	1,34	3,20	6,70	10,8	15,0
86,1	2,00	5,10	10,4	16,4	23,5
120	2,85	6,40	14,4	23,0	30,5
155	3,30	7,40	16,4	27,0	38,5
205	4,30	9,70	22,0	36,0	54,0
252	5,60	13,0	29,0	46,0	66,0
311	7,50	16,2	36,5	58,0	87,0

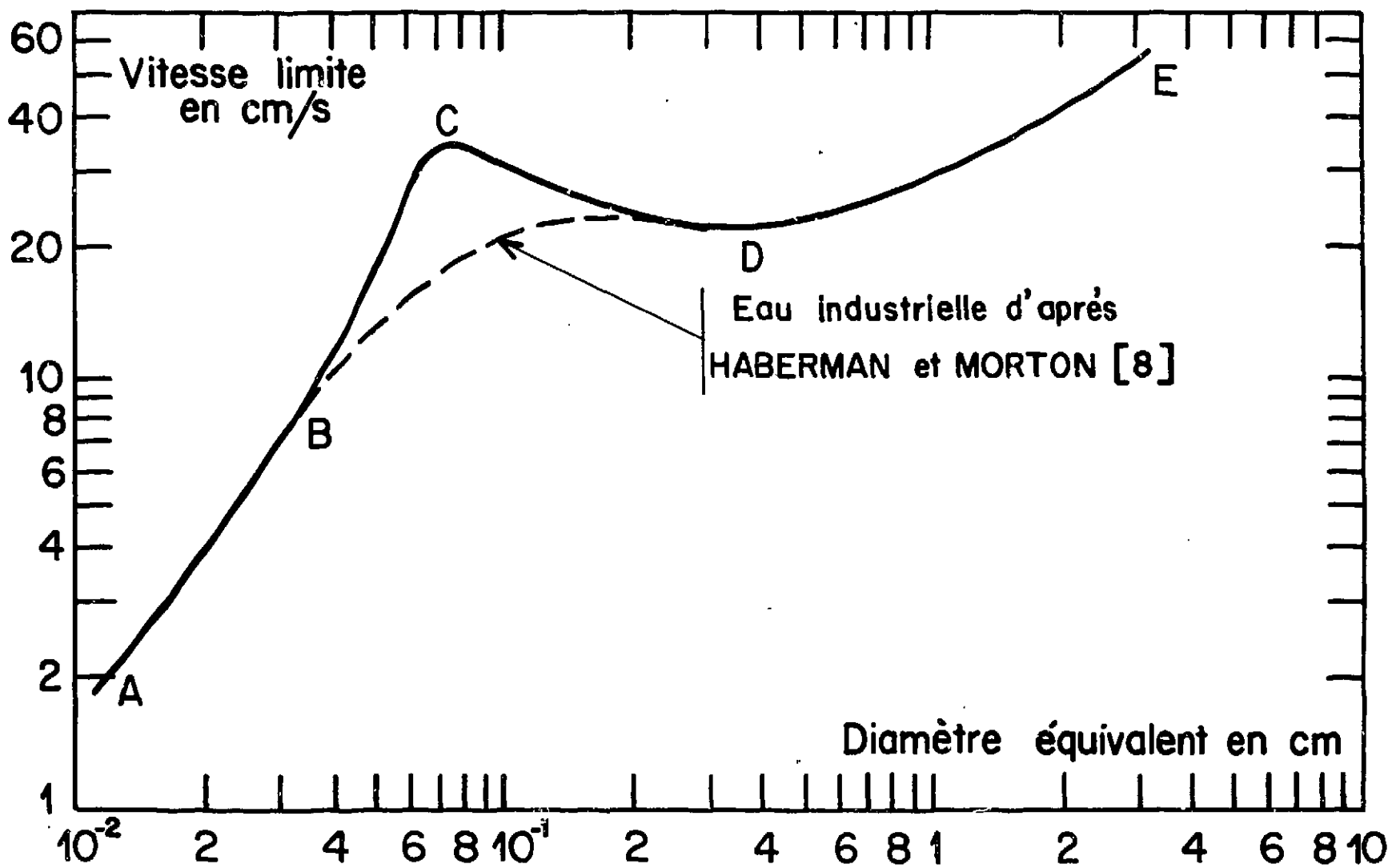


Figure n° 14 - Vitesse limite de montée d'une bulle d'air dans de l'eau distillée ou filtrée en fonction de sa taille.

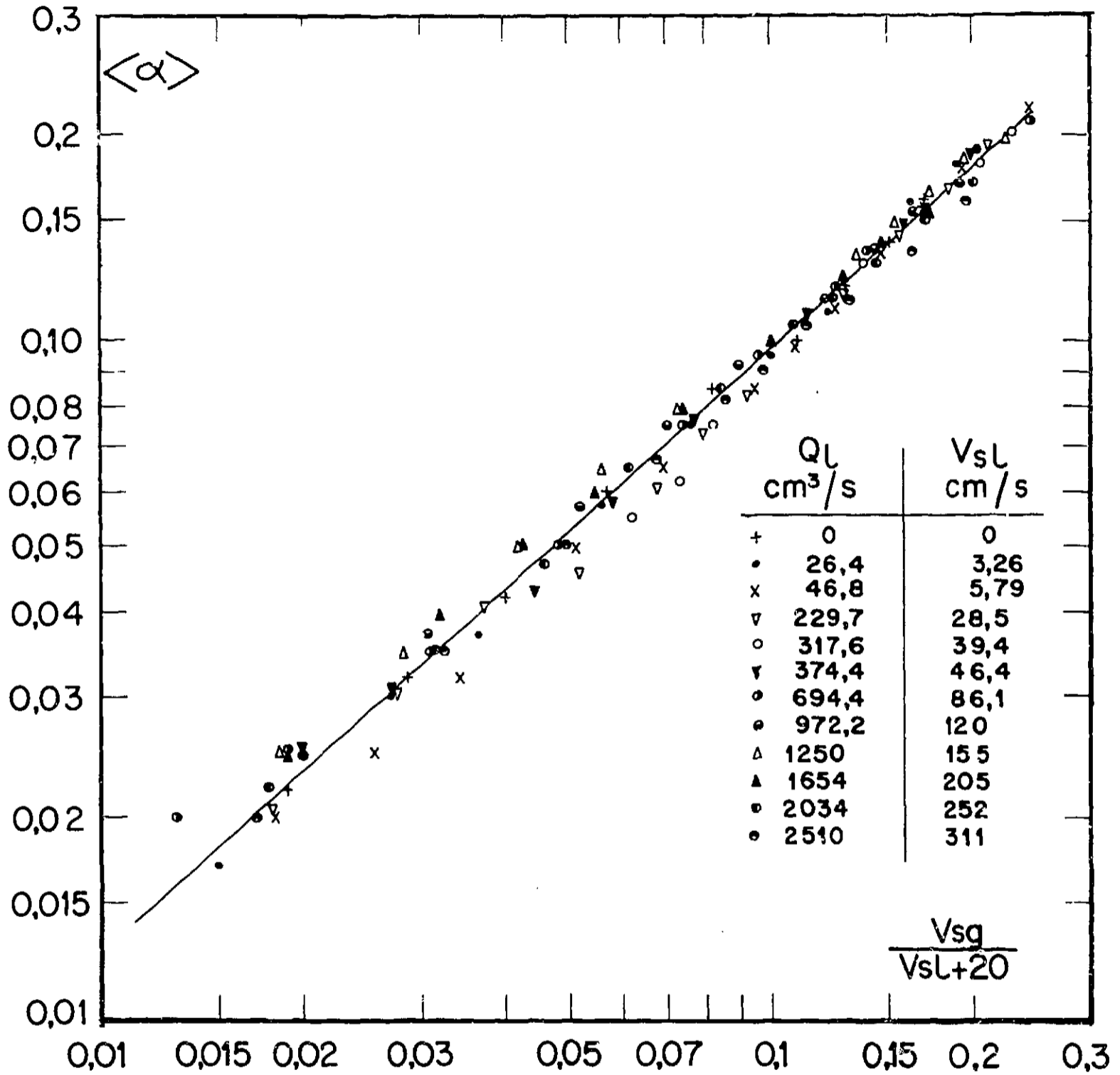


Figure n° 15-1 - Fraction de vide moyenne en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$ -
Tube de diamètre 32 mm - Régime à bulles indépendantes.

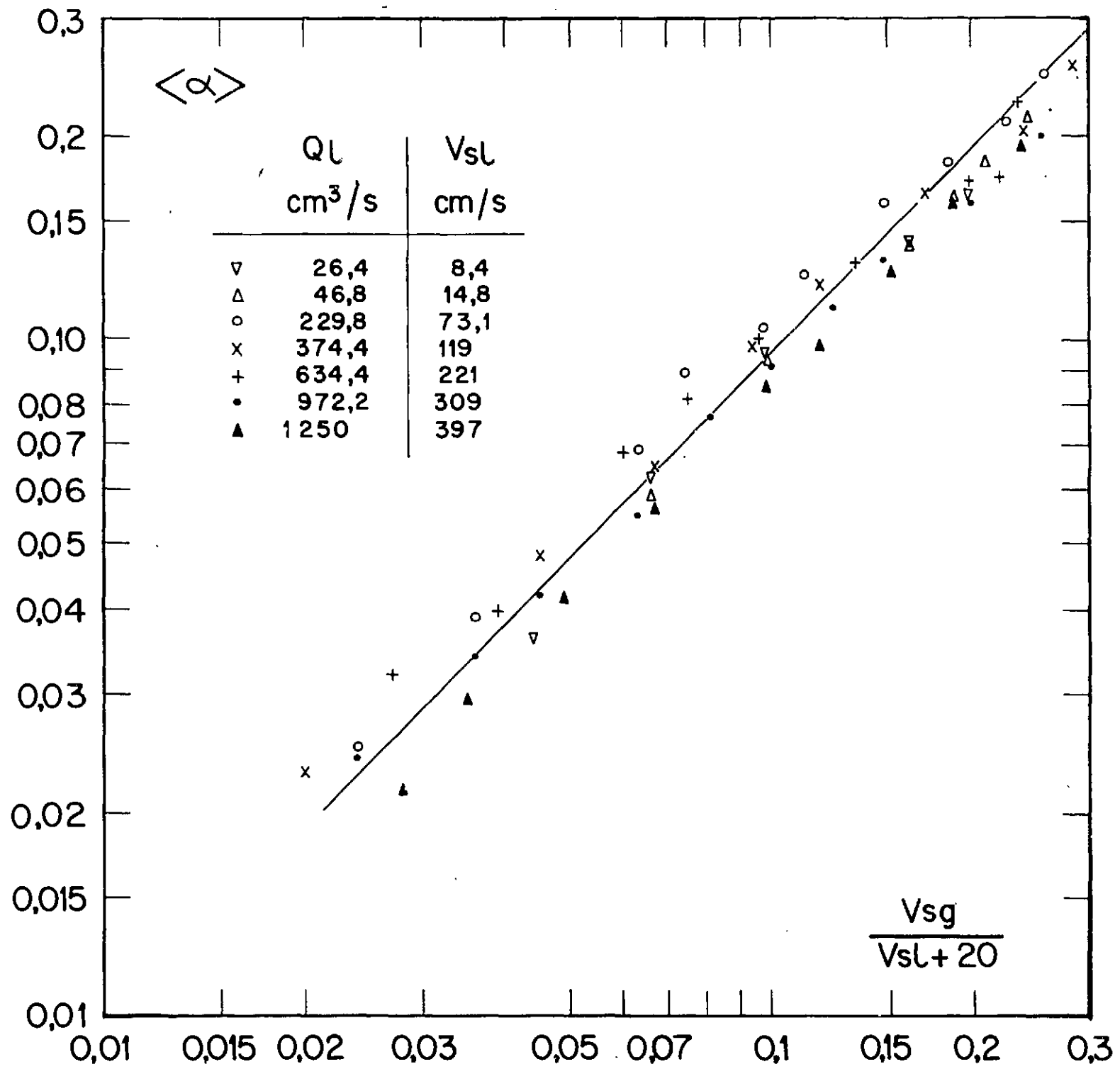


Figure n° 15-2 - Fraction de vide moyenne en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$
 Tube de diamètre 20 mm - Régime à bulles indépendantes.

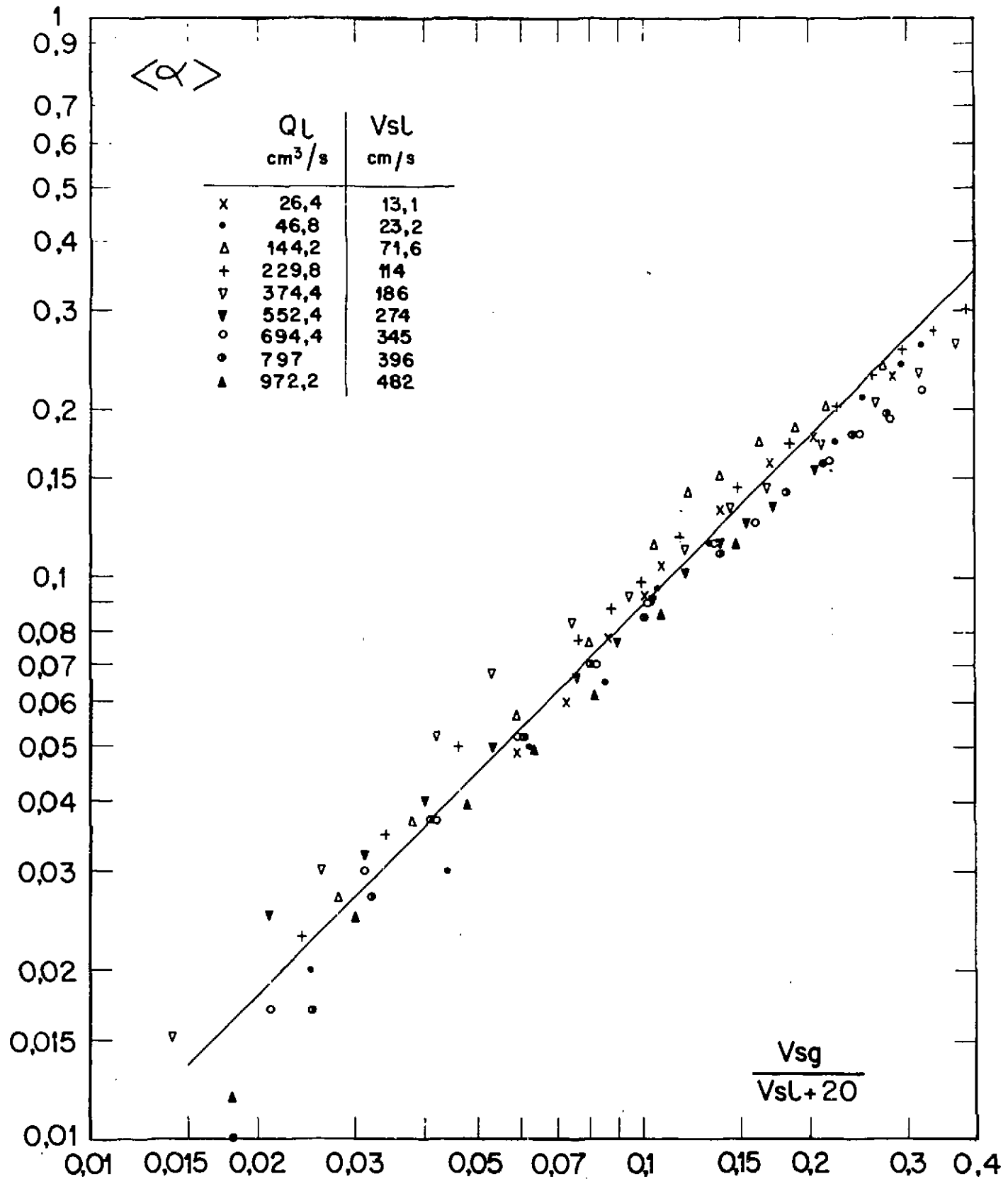


Figure n° 15-3 - Fraction de vide moyenne en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$
 Tube de diamètre 16 mm - Régime à bulles indépendantes.

Or, comme l'indique la figure 14, la vitesse limite de montée d'une bulle d'air de diamètre équivalent à 1 à 6 mm, dans de l'eau qui occupe un espace qu'on peut considérer comme infini par rapport aux dimensions de la bulle, est voisine de 20 cm/s. Dans nos expériences nous avons obtenu des bulles de cet ordre de grandeur [9].

Pour le régime à bulles indépendantes, tout se passe donc comme si, à la vitesse superficielle V_{sl} , se superposait la vitesse qu'auraient les bulles en milieu infini immobile. Afin de voir s'il était possible de déterminer la fonction $F \left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} \right)$, nous avons porté sur un graphique en coordonnées log - log, $\langle \alpha \rangle$ en fonction du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20}$: (fig. 14.1 ; 14.2 ; 14.3). Nous avons seulement considéré les valeurs pour lesquelles le régime d'écoulement est à bulles indépendantes.

Pour chacun des tubes, les points se rassemblent autour d'une droite.

La fonction $F \left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} \right)$ est donc de la forme :

$$c \left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} \right)^n$$

Nous avons calculé c et n par la méthode des moindres carrés.

Pour le tube de diamètre 32 mm nous trouvons :

$$\langle \alpha \rangle = 0,731 \left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} \right)^{0,884} \quad (11)$$

Pour le tube de diamètre 20 mm :

$$\langle \alpha \rangle = 0,986 \left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} \right)^{1,01} \quad (12)$$

Pour le tube de diamètre 16 mm :

$$\langle \alpha \rangle = 0,900 \left(\frac{V_{sg}}{V_{sl} + 20} \right)^1 \quad (13)$$

Nous voyons apparaître une influence du diamètre du canal, qui se traduit par des valeurs différentes des coefficients et des exposants. Pour les tubes de diamètres 20 mm et 16 mm, qui sont des valeurs voisines, les résultats diffèrent assez peu. La différence est beaucoup plus sensible sur le tube de diamètre 32 mm.

Si nous mettons les équations (11), (12), (13) sous la forme $V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle)$, nous obtenons :

$$V_{sg} = 1,37 \alpha^{1,14} (V_{sl} + 20) \quad (11')$$

$$V_{sg} = 1,01 \alpha (V_{sl} + 20) \quad (12')$$

$$V_{sg} = 1,11 \alpha (V_{sl} + 20) \quad (13')$$

Si nous comparons ces résultats à l'équation (6), nous voyons que les équations (11'), (12'), (13') et (6) ont bien la même forme que l'équation (7) :

$$V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) \cdot g(V_{sl})$$

La fonction de V_{sl} est d'ailleurs sensiblement la même dans les équations (11') (12') (13') et dans l'équation (6).

En effet, quand on prend $Co = 1,13$, on trouve :

$$\frac{u}{Co} = 17 \text{ cm/s pour } u = 1,18 \left(\frac{\sigma_1 g (\rho_1 - \rho_g)}{\rho_1^2} \right)^{1/4}$$

et

$$\frac{u}{Co} = 22 \text{ cm/s pour } u = 1,53 \left(\frac{\sigma_1 g (\rho_1 - \rho_g)}{\rho_1} \right)^{1/4}$$

Résultats qui sont très proches de 20 cm/s.

Mais la fonction de $\langle \alpha \rangle$ trouvée expérimentalement, diffère nettement de la fonction théorique établie dans l'équation (6).

La fonction de $\langle \alpha \rangle$ dans l'équation (6) ne peut être assimilée à une forme linéaire que si $\langle \alpha \rangle$ est petit devant $\frac{1}{Co}$. Comme $\frac{1}{Co} = 0,833$, la fonction $f(\langle \alpha \rangle)$ ne peut être assimilée à une fonction linéaire que pour $\langle \alpha \rangle < 0,1$, alors que les équations (12') et (13') qui sont linéaires en $\langle \alpha \rangle$, sont valables jusqu'à $\langle \alpha \rangle = 0,28$.

Pour le régime à bulles indépendantes, nous retrouvons donc expérimentalement une fonction de la vitesse superficielle de la phase liquide (ou du débit liquide) de la même forme que celle trouvée pour les régimes "churn turbulent bubbly" et bouchons dans [3] [4], mais la fonction de $\langle \alpha \rangle$ diffère nettement de celle trouvée pour ces deux régimes.

CONCLUSION

Nous avons pu montrer l'influence de la configuration de l'écoulement sur la fraction de vide moyenne $\langle \alpha \rangle$. Les relations qui lient la fraction de vide moyenne aux paramètres d'entrée qui sont les débits Q_g et Q_l sont en effet différentes suivant la configuration de l'écoulement. Pour les régimes semi-annulaire et annulaire $\langle \alpha \rangle$ semble ne dépendre que du rapport $\frac{V_{sg}}{V_{sl}}$ (ou $\frac{Q_g}{Q_l}$).

Pour les autres régimes (bulles et bouchons) il est nécessaire d'introduire un nouveau paramètre qui tient compte de la différence des masses spécifiques des deux phases.

Le régime à bulles a été subdivisé en bulles indépendantes, dans lequel les bulles ne réagissent pas les unes sur les autres, et bulles agglomérées, dans lequel les bulles se rassemblent à mesure qu'elles montent dans le canal. Lors du régime à bulles indépendantes, la fraction de vide moyenne reste la même tout le long du canal, alors que pour le régime à bulles agglomérées, elle évolue le long du canal. Il semble que le régime à bulles agglomérées doive être considéré comme un régime de transition entre le régime à bulles (qui est le régime à bulles indépendantes), et le régime à bouchons.

Les relations entre $\langle \alpha \rangle$, V_{sl} et V_{sg} sont pour les régimes à bulles et le régime à bouchons, de la forme :

$$V_{sg} = f(\langle \alpha \rangle) \cdot g(V_{sl})$$

Cette forme d'équation s'accorde bien avec les résultats théoriques et expérimentaux trouvés dans la littérature.

Dans le cas du régime à bulles indépendantes, nous avons pu déterminer les deux fonctions $f(\langle \alpha \rangle)$ et $g(V_{sl})$ et nous trouvons :

$$V_{sg} = k \alpha^n (V_{sl} + 20)$$

avec $n = 1$ pour les tubes de diamètre 20 mm et 16 mm,

et $n = 1,14$ pour le tube de diamètre 32 mm.

Nous retrouvons ainsi expérimentalement une fonction $g(V_{sl})$ voisine de celle donnée dans [3] et [4], mais une fonction $f(\langle \alpha \rangle)$ différente.

REMERCIEMENTS

Je remercie très chaleureusement Monsieur C. LACKME qui m'a bien souvent encouragé.

Je remercie aussi bien vivement Monsieur A. MERLE, qui, par ses mesures très soignées, a beaucoup contribué à l'avancement de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. BEHRINGER
The flow of liquid-gas mixtures in vertical tubes Zeit - Ges Kälte - Ind. 1936, vol. 43, p. 55-58, AEC Translation 1777.
- [2] A. ARMAND
The flow mechanism of a two phase mixture in a vertical tube. AEC tr 4490, p. 19-34.
- [3] N. ZUBER - S.A. FINDLAY
Average volumetric concentration in two phase flow systems. Journal of heat transfer, 1965, 87 C. 4, p. 453-468.
- [4] N. ZUBER - F.W. STAUB - G. BIJWAARD
Vapor void fraction in subcooled boiling and in saturated boiling systems. Proceedings of the third International Heat transfer Conference - Chicago. American Institute of Chemical Engineers 1966 - vol. 5, p. 24-38.
- [5] S.G. BANKOFF
A variable density single fluid model for two phase flow, with particular reference to steam water flow. Journal of heat Transfer, 1960 - 82 C - p. 265-272 .
- [6] S.S. KUTATELADZE - M.A. STYRIKOVICH
Hydraulics of gas - liquid systems, 1958. - AEC traduction F - TS - 9814/V, 1960.
- [7] C. LACKME
Structure et cinématique des écoulements diphasiques à bulles. - Rapport CEA 3203 Novembre 1966.
- [8] W.L. HABERMAN - R.K. MORTON
An experimental study of bubbles moving in liquids - Transactions American Society of Civil Engineers 1956, 121, p. 227-252.
- [9] A. MERLE
Détermination du volume moyen des bulles d'air dans un écoulement vertical ascendant eau-air. Note TT - n° 221, avril 1966.

FIN