
Écoulements diphasiques à poches en conduite horizontale*

Two-phase pocket flow in horizontal pipes

Daniel Ferré

Introduction

L'étude expérimentale présentée ici est une simulation du transport diphasique horizontale d'huile et de gaz par oléoduc. Le régime étudié, l'écoulement à poche, est le plus fréquemment observé. Il se décrit par une succession alternée et aléatoire de grandes cavités gazeuses (les poches) et de zones essentiellement liquides (les bouchons) contenant souvent de petites bulles. La simulation est réalisée dans des conditions de laboratoire avec de l'air et de l'eau, dont le rapport des masses volumiques ρ_G/ρ_L est 10 fois plus petit environ que dans le cas pétrolier. En revanche, la grande gamme de vitesse couverte par l'installation permet de trouver des zones de recouvrement pour les nombres de Reynolds, de Bond et de Froude des installations pétrolières et des expériences de laboratoire. Les nombres d'Archimède et de Weber sont également voisins dans les deux cas.

Expérimentation

L'installation expérimentale (fig. 1) est constituée d'une conduite de diamètre nominal $D = 0,045$ m et de longueur utile 50 m. Les effluents, l'air et l'eau, sont utilisés à température et pression ambiantes. La vitesse débitante de l'air, réglée par un jeu de tuyères soniques

peut varier entre 0,3 et 10 m/s. L'eau circule en circuit fermé. Le groupe pompe-débitmétrique (diaphragme) permet de mesurer des vitesses débitantes U_L , de 0,5 à 2 m/s.

Un mélangeur, à l'amont de la conduite, permet d'introduire les deux phases sous forme d'un écoulement homogène à bulles le moins propice possible à la formation de longues poches de gaz. Les écoulements à poches se forment par coalescence des bulles.

Le dispositif de séparation minimise les fluctuations de pression engendrées en sortie par le passage alterné d'air et d'eau. Le fonctionnement du mélangeur ne peut donc pas être perturbé par les réflexions d'ondes de pression.

12 prises de pression régulièrement réparties tous les 4 m sur la génératrice inférieure de la conduite et un multimanomètre à mercure permettent la mesure directe du gradient de pression. Des tubes capillaires limitent en partie les importantes fluctuations de pression inhérentes aux écoulements diphasiques.

La détection de la phase gazeuse et de la phase liquide est confiée à 11 sondes optiques pariétales installées sur la génératrice supérieure de la conduite. Ces sondes sont construites à l'aide de prismes à réflexion totale ; les signaux optiques, convertis en signaux électriques, sont enregistrés pour traitements statistiques ultérieurs.

Ces signaux, traités numériquement, sont transcrits sous forme d'une suite de nombres représentant le passage alterné des poches et des bouchons. Les périodes, vitesses et longueurs des poches et des bouchons sont calculées à l'aide des données provenant de deux sondes espacées de la distance d . Le taux de coalescence des poches se déduit de la probabilité de disparition d'une poche dans son parcours entre les deux sondes.

(*) D'après la thèse de doctorat de 3^e cycle de D. Ferré, réalisée au Laboratoire de Mécanique Expérimentale des Fluides d'Orsay et à l'Institut Français du Pétrole (dans le cadre d'une bourse de l'Ecole Nationale Supérieure des Pétroles et des Moteurs), soutenue le 12 mai 1978 à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

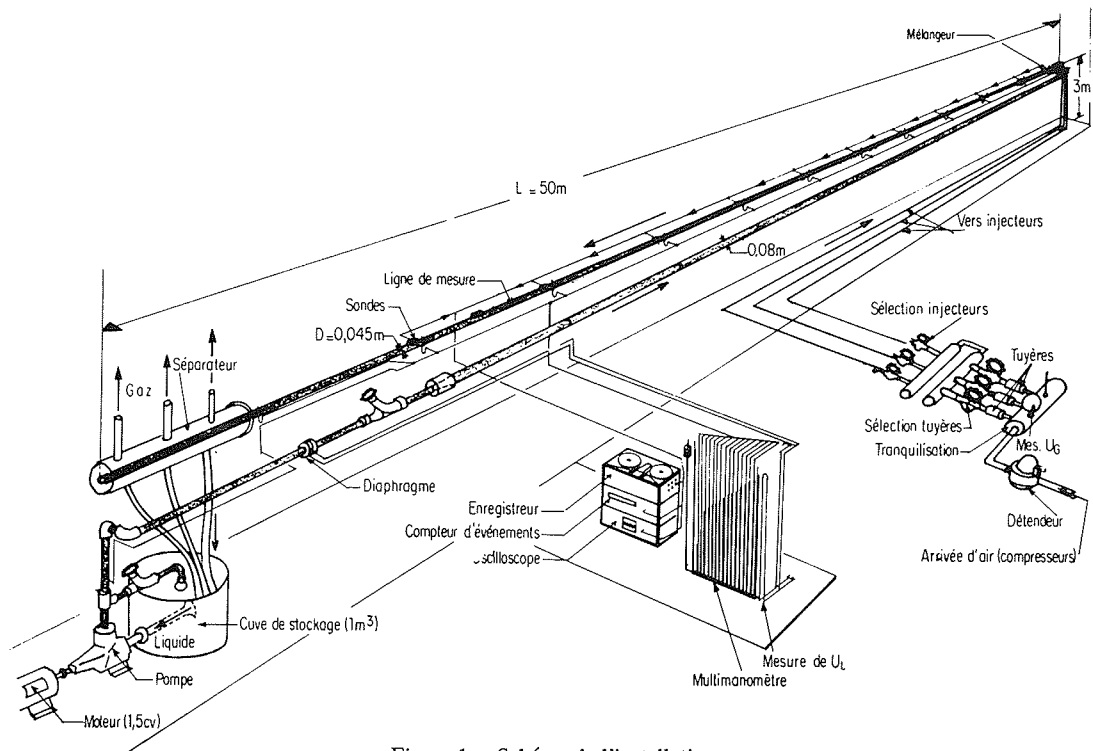


Figure 1 – Schéma de l'installation.

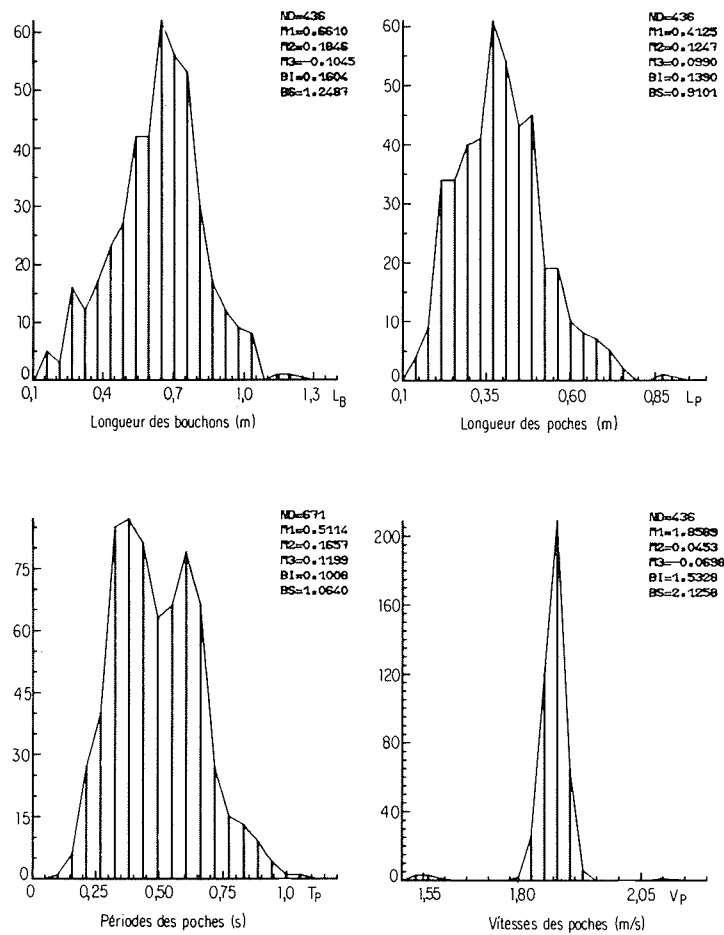


Figure 2 – Exemples d'histogrammes. ($U_G = 0,36$ m/s ; $U_L = 1,1$ m/s ; $D = 0,045$ m). ND : effectif de l'échantillon ; M_1, M_2, M_3 : moments d'ordre 1 à 3 ; BI, BS : bornes inférieure et supérieure de l'échantillon.

Résultats

Etude des histogrammes

L'analyse statistique comporte en particulier l'étude des histogrammes des différentes grandeurs (fig. 2). Le résultat le plus remarquable est la très faible dispersion des vitesses des poches autour de leur valeur moyenne. La vitesse des poches de gaz dépendrait donc d'un phénomène quasiment déterministe. Au contraire les histogrammes des périodes et des longueurs présentent toujours une très forte dispersion. Le test du χ^2 appliqué à l'ensemble des histogrammes obtenus au cours de cette étude (1 700 cas) n'infirme pas l'hypothèse de conformité des histogrammes à la loi normale ; ce résultat est donné avec un seuil de signification de 5 %.

Analyse paramétrique

Périodes : \bar{T}_p

Le résultat le plus caractéristique concernant les périodes est déjà connu : les périodes passent par un maximum lorsque U_G augmente (fig. 3). Dans notre cas, ce maximum se situe vers $U_G \approx 4$ m/s pour toutes les vitesses débitantes liquides étudiées ($0,52 \leq U_L \leq 1,43$ m/s).

Vitesses des poches : \bar{V}_p

Les vitesses moyennes des poches ont une dépendance quasi-fonctionnelle avec la somme des vitesses débitantes $U_G + U_L$ (fig. 4). Le domaine des vitesses peut être découpé en trois zones dans lesquelles les relations $\bar{V}_p(U_G + U_L)$ sont représentées par des droites (fig. 4).

$0 \leq U_G + U_L \leq 1,5$ m/s :

$$\bar{V}_p = 1,1(U_G + U_L) + 0,29$$

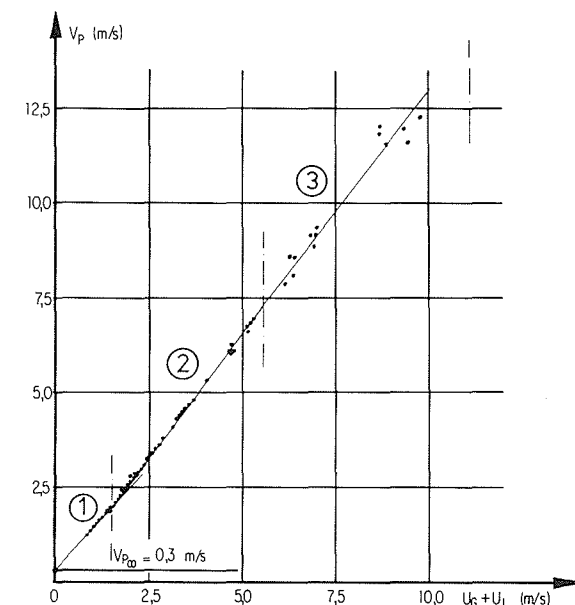


Figure 4 - Vitesses des poches de gaz en fonction de $U_G + U_L$.

On reconnaît ici le terme constant (0,29 m/s) qui correspond à la vitesse de propagation d'une poche de gaz dans une conduite horizontale contenant de l'eau au repos. Cette vitesse a été également mesurée par Zukoski [1] et calculée par Fitremann [2].

$1,5 \leq U_G + U_L \leq 5,5$ m/s : $\bar{V}_p = 1,3(U_G + U_L)$

On retrouve une loi souvent donnée dans la littérature [3, 4] avec des coefficients variant de 1,2 à 1,35.

$5,5 \leq U_G + U_L \leq 11$ m/s :

$$\bar{V}_p = 1,02(U_G + U_L) + 2$$

Il convient de ne généraliser cette loi qu'avec précaution en égard à l'augmentation de la dispersion des points de mesure dans cette zone.

Longueurs des poches et des bouchons : \bar{L}_p et \bar{L}_B

Les longueurs moyennes des poches \bar{L}_p augmentent avec U_G à U_L constant et semblent atteindre un maximum pour $U_G \approx 8$ m/s.

Les variations des longueurs moyennes des bouchons avec U_G et U_L sont assez surprenantes (fig. 5) ; les bouchons augmentent de taille lorsque les vitesses débitantes croissent. Pour les très faibles valeurs de U_G et les grandes valeurs de U_L , \bar{L}_B semble tendre vers l'infini (écoulement monophasique liquide). Dans ce cas les courbes passeraient par un minimum pour $U_G \approx 0,35$ m/s.

Les variations de \bar{L}_B avec U_G indiquent une faible dépendance avec U_L . Le test de Student appliqué au coefficient de corrélation de \bar{L}_B et U_L n'infirme pas cette assertion avec un seuil de signification de 5 %.

D'autre part, il semble qu'au-delà de $U_G \approx 6$ m/s, \bar{L}_B devient également indépendant de U_G . Il y aurait donc un calibrage statistique des bouchons aux fortes

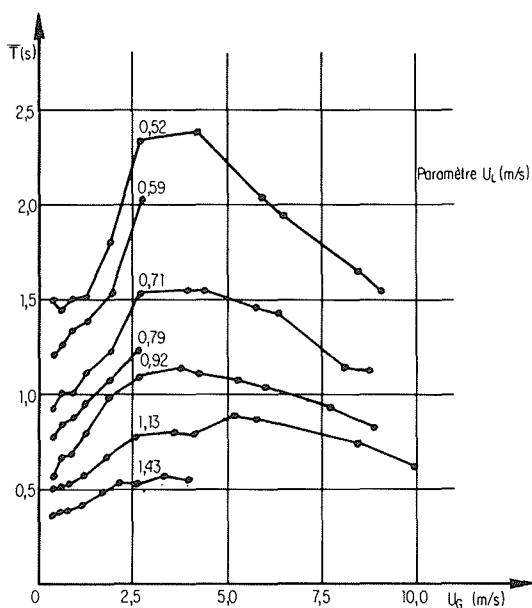


Figure 3 - Période des poches et des bouchons en fonction de U_G pour différentes valeurs de U_L .

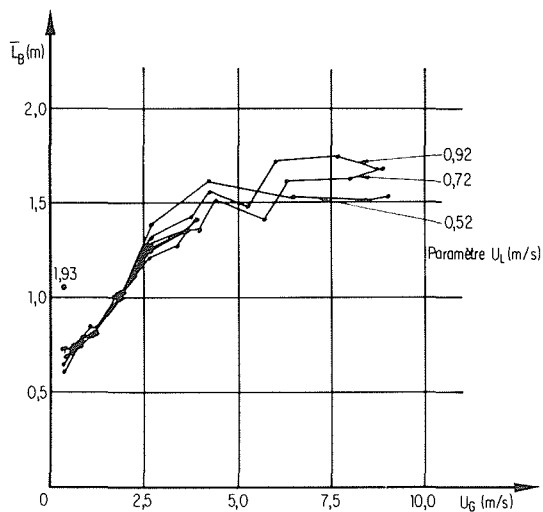


Figure 5 - Longueur des bouchons en fonction de U_G pour différentes valeurs de U_L .

valeurs de U_G . Ceci a d'ailleurs été déjà remarqué en écoulement à poches vertical ascendant [5].

Gradient de pression ($-\partial\bar{p}/\partial x$)

Le gradient de pression est mesuré globalement sur toute la ligne. Malgré la détente du gaz non négligeable, nous supposons que ($-\partial\bar{p}/\partial x$) est à peu près constant le long de la ligne et nous discuterons des résultats en représentant les variations en fonction du débit massique de gaz Q_G .

Les variations de ($-\partial\bar{p}/\partial x$) en fonction de Q_G à U_L constant montrent que ($-\partial\bar{p}/\partial x$) varie à peu près linéairement avec Q_G .

A Q_G constant les courbes ($-\partial\bar{p}/\partial x$) fonctions de U_L se déduisent par homothétie de la courbe obtenue expérimentalement pour $Q_G = 0$ (écoulement monophasique liquide) (fig. 6).

($-\partial\bar{p}/\partial x$) est donc proportionnel à U_G lorsque $U_L = cte$ et à U_L^2 lorsque $U_G = cte$. On peut montrer

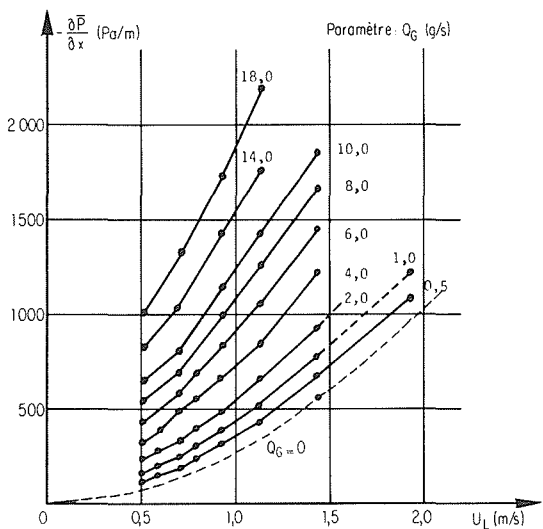


Figure 6 - Gradient de pression moyen en fonction de U_L pour différentes valeurs de Q_G .

qu'en fait ($-\partial p/\partial x$) doit être à peu près proportionnel à $U_L (U_G + U_L)$ [6].

Longueur d'établissement

La détente du gaz dans la ligne provoque l'augmentation de la vitesse débitante locale du gaz et par suite celle de la vitesse des poches. De même elle provoque le réarrangement constant des poches et des bouchons. Au-delà de la distance $L_E = 26$ m comptée à partir du mélangeur, les grandeurs \bar{T} , \bar{V}_p , \bar{L}_p , \bar{L}_B sont liées à la vitesse débitante locale du gaz U_G par des relations identiques à celles qui viennent d'être présentées.

D'autre part, le taux de coalescence décroît au fur et à mesure de la formation des poches de gaz en amont de la conduite. Au-delà de la même valeur $L_E = 26$ m il oscille autour d'une valeur constante $\bar{\omega}_E$. Cette distance, à partir de laquelle les variables ne dépendent plus que des conditions débitométriques et thermodynamiques locales est nommée : longueur d'établissement cinématique des écoulements.

Coalescence

L'analyse des variations du taux de coalescence en fin de ligne montre une augmentation quasi-fonctionnelle de $\bar{\omega}_E$ avec $U_G + U_L$ (fig. 7). La persistance de la coalescence en fin de ligne traduit le réarrangement constant de la typologie des écoulements, conséquence de la détente du gaz.

Conclusions

Par le biais de la coalescence, les propriétés thermodynamiques du gaz apparaissent importantes vis-à-vis de la typologie des écoulements. Dans ces conditions, il faut se demander si les variables \bar{T} , \bar{L}_p , ou \bar{L}_B sont significatives ou bien si la connaissance du paramètre $\bar{\omega}_E$ est plus riche d'information pour modéliser les écoulements.

Une modélisation simple du gradient de pression est possible en supposant la pression constante dans les poches de gaz [6]. On peut alors tenir compte de la

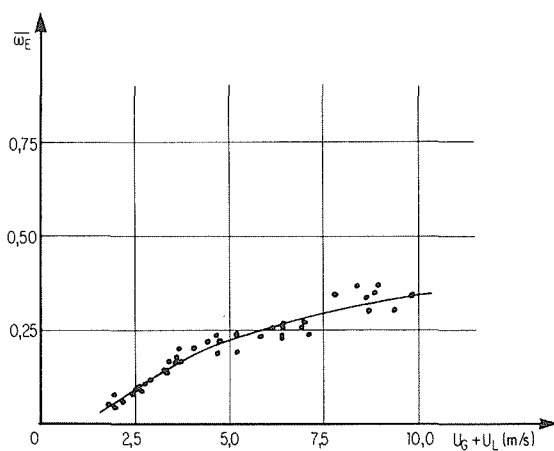


Figure 7 - Taux de coalescence établi en fonction de $U_G + U_L$.

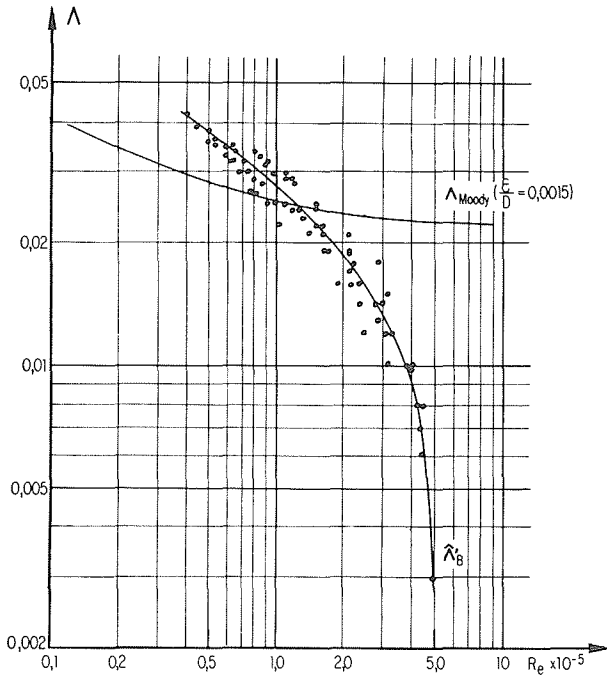


Figure 8 - Coefficient de frottement expérimental pour un écoulement accéléré en fonction du nombre de Reynolds.

détente du gaz, et le modèle impose la recherche d'un coefficient $\hat{\lambda}'_B$ tel que :

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\hat{\lambda}'_B}{D} \frac{\frac{1}{2} \rho_L (U_G + U_L)^2}{1 - M^2} (1 - \alpha_0)$$

où :

α_0 est le taux de présence des poches au sommet de la conduite,

$U_G + U_L$ est une bonne estimation de la vitesse du liquide dans les bouchons,

M est un nombre de Mach où intervient le rapport ρ_L / ρ_G .

$$M^2 = 2 \frac{PL}{PG} \frac{U_G (U_G + U_L)}{rT}$$

Par analogie avec un écoulement monophasique liquide, nous avons étudié les variations de $\hat{\lambda}'_B$ avec

un nombre de Reynolds (fig. 8) :

$$Re = \frac{\rho_L D (U_G + U_L)}{\mu_L}$$

Le fait le plus remarquable est la rapide décroissance de $\hat{\lambda}'_B$ avec Re comparativement au coefficient de perte de charge du diagramme de Moody. Ceci indique que le modèle surestime certainement le gradient de pression dans les bouchons ; la dispersion des points expérimentaux tend d'ailleurs à prouver que les variations de $\hat{\lambda}'_B$ ne peuvent être représentées par un unique nombre de Reynolds.

Cette modélisation est construite autour des valeurs expérimentales \bar{T} , \bar{V}_p , \bar{L}_p et \bar{L}_B . Elle ne tient compte que de l'aspect macroscopique (poches et bouchons) des écoulements. Si nous savons que la présence des bulles dans les bouchons est déterminante en écoulements verticaux et inclinés [5], aucune analyse n'a été effectuée dans ce sens pour les écoulements horizontaux. Les études antérieures de Ros [7] et le comportement du coefficient $\hat{\lambda}'_B$ calculé précédemment semblent confirmer l'importance de la présence des bulles dans les bouchons. Une étude approfondie semble donc être nécessaire.

Bibliographie

- [1] ZUKOSKI E.E. - Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. *J. Fluid Mech.*, vol. 25, part. 4, 1966, pp. 821-837.
- [2] FITREMANN J.M. - *Reflexions sur les écoulements à bouchons dans les conduites horizontales ou faiblement inclinées*. 2^e congrès de Mécanique, Toulouse, 1975.
- [3] GREGORY G.A. and SCOTT D.S. - Correlation of liquid velocity and frequency in horizontal gas-liquid slug flow. *AIChE Journal*, Vol. 15, N° 6, nov. 1969, pp. 833-835.
- [4] HUBBARD M.G. - Ph. D. Thesis, University of Houston, Texas, 1965.
- [5] FITREMANN J.M. - *Écoulements diphasiques : théorie et application à l'étude de quelques régimes d'écoulements verticaux ascendants d'un mélange gaz-liquide*. Thèse de docteur ès-Sciences, Paris, 1977.
- [6] FERRE D. - *Étude expérimentale des écoulements diphasiques gaz-liquide en conduite horizontale*. Thèse de docteur 3^e cycle, Paris, 1978.
- [7] ROS N.C.J. - Simultaneous flow of gas and liquid as encountered in well-tubing. *J. of Petroleum Technology*, October 1961, pp. 1037-1049.