

# ÉTUDE SUR LA PRÉDICTION DE L'INVERSION DE PHASE

**S. DECARRE et J. FABRE**

Institut de mécanique des fluides<sup>1</sup>

En écoulement diphasique eau-huile dans lequel une des phases est dispersée dans l'autre, il peut se produire sous certaine condition d'écoulement une inversion de phase, la phase continue devenant dispersée. Ce phénomène, qui contrôle la nature de la phase mouillant la paroi de la conduite dans laquelle s'écoulent les phases, a des conséquences importantes sur la corrosion et sur la perte de charge. Nous présentons un modèle d'inversion, basé sur une approche thermodynamique, valable pour tous les régimes d'écoulement. Les données expérimentales utilisées pour la validation du modèle sont issues d'une étude bibliographique. En écoulement laminaire, cette approche conduit à des résultats similaires à ceux du modèle de Yeh. Pour la plupart des données disponibles, ce modèle prédit bien la fraction critique pour laquelle l'inversion de phase se produit.

## PHASE INVERSION BEHAVIOR FOR LIQUID-LIQUID DISPERSIONS

In two phase oil-water dispersed flow, a phase inversion may occur whereby the continuous phase becomes dispersed. This phenomenon which controls the nature of the phase in contact with the pipe has a great importance on the corrosion and on the pressure drop. A model for the phase inversion is presented, it is based on a thermodynamic approach, and it is valid for all flow regimes. Experimental data from the literature are used to validate the model. In laminar flow, this approach gives similar results to those obtained by Yeh. For most data, the model agrees well with the experimental data.

## ESTUDIO ACERCA DE LA PREDICCIÓN DE LA INVERSIÓN DE FASE

En flujo difásico agua-aceite, en el cual una de las fases se encuentra en dispersión en la otra, puede producirse, en ciertas condiciones de flujo, una inversión en cuyo caso la fase continua pasa al estado de dispersión. Este fenómeno, que controla la naturaleza de la fase humectante de la pared del conducto, dentro del cual fluyen las fases, tiene importantes consecuencias con respecto a la corrosión y a las pérdidas de carga. Se presenta en este artículo un modelo de inversión, fundado en un enfoque termodinámico, valedero para todos los regímenes de flujo. Los datos experimentales utilizados para la validación del modelo proceden de un estudio bibliográfico. En flujo laminar, este enfoque conduce a resultados similares de aquellos del modelo de Yeh. Para la mayor parte de los datos disponibles, este modelo predice correctamente la fracción crítica para la cual se produce la inversión de fase.

(1) UMR 5502 CNRS / INP-UPS,  
Allée du Professeur Camille Soula,  
31400 Toulouse - France

## INTRODUCTION

En écoulement diphasique de deux liquides non miscibles en tube, l'une des deux phases peut être dispersée sous forme de gouttelettes dans l'autre phase lorsque les vitesses sont suffisamment élevées pour que la déformation ou la turbulence fragmente et disperse les interfaces. Lorsque l'on augmente le débit de la phase dispersée, en maintenant le débit total constant, il existe une fraction de phase critique au-delà de laquelle la phase dispersée devient continue et vice versa [1]. Cette modification de la topologie de l'écoulement correspond à une transition de configuration appelée « inversion de phase ». En écoulement à trois phases liquide-liquide-gaz, un phénomène identique peut être observé entre les deux phases liquides [2].

Ce phénomène est d'une réelle importance dans l'industrie chimique et pétrolière. En effet, il conditionne la nature de la phase qui « mouille » la paroi de la conduite. Il est facilement concevable que la nature de cette phase a, par sa viscosité, une influence sur le frottement pariétal, et par sa nature, des conséquences sur la corrosion possible de la conduite. En effet, comme on l'observe sur la figure 1, la perte de charge change brusquement lorsque cette inversion de phase se produit : elle diminue lorsque la viscosité de la phase qui mouille la paroi diminue. En ce qui concerne la corrosion, la présence à la paroi de la phase aqueuse constitue un facteur aggravant.

C'est la raison pour laquelle de nombreuses études paramétriques ont été réalisées. Elles ont été faites

généralement avec de l'eau et de l'huile, soit en situation quasi statique, soit en écoulement. Dans le premier cas, les deux liquides sont préalablement introduits dans une petite cuve agitée, la phase continue est alors déterminée visuellement ou à l'aide d'une sonde résistive. En général, les expérimentateurs recherchent la fraction de phase critique pour laquelle l'inversion apparaît, en ajoutant progressivement au mélange du liquide de même nature que la phase dispersée. Dans le second cas, on s'intéresse à la configuration en écoulement et on déduit soit visuellement, soit par la signature du gradient de pression, la nature de la phase continue. Il ressort d'une analyse bibliographique que la fraction de phase critique dépend en général des propriétés physiques des fluides ainsi que de l'énergie apportée au système.

Parmi les auteurs qui ont mis en évidence le rôle des propriétés physiques, il faut citer tout d'abord les études quasi statiques en cuve [4, 5, 6, 7]. Les auteurs se sont surtout intéressés à la viscosité des phases, qui joue un rôle essentiel dans le phénomène d'inversion. Ils ont tous constaté que la tendance d'une phase à rester dispersée croît avec sa viscosité. Selker et Sleicher [5] ont remarqué l'existence d'un domaine d'ambivalence à l'intérieur duquel chacun des constituants peut se trouver sous forme dispersée stable (fig. 2) selon l'histoire de la création de la dispersion. La phase continue dans cette zone correspond en effet à la phase dans laquelle la dispersion a été générée. Leur étude, en accord avec l'influence de la viscosité sur la fraction critique, a montré la dépendance des limites de cette zone vis-à-vis du rapport des viscosités. Luhning et Sawistowski [6]

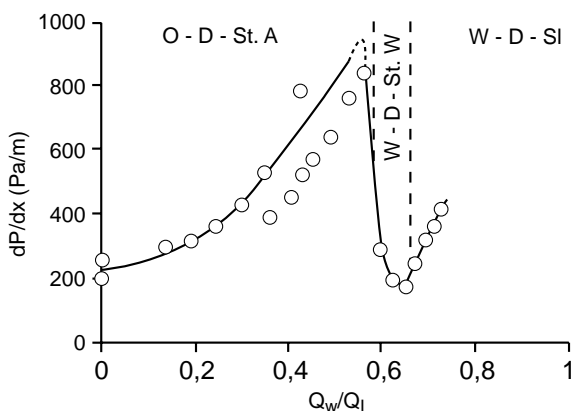


Figure 1

Influence de l'inversion de phase sur le gradient de pression d'après Pan [3].

*Action of phase inversion on pressure drop, Pan [3].*

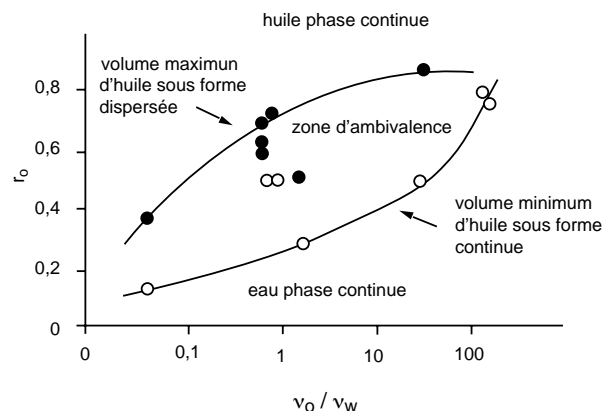


Figure 2

Limites de la zone d'ambivalence d'après Selker et Sleicher [5].

*Limits of ambivalent region, Selker and Sleicher [5].*

constatent que si la tension superficielle entre les deux phases augmente, l'extension du domaine d'ambivalence diminue.

L'influence de la viscosité des fluides sur l'inversion a aussi été confirmée en conduite [8, 9, 10]. La figure 3 obtenue par Oglesby [8] montre que si on se limite au cas où le régime d'écoulement est supposé être laminaire (vitesse moyenne inférieure à 1,83 m/s), la fraction critique d'huile augmente si sa viscosité augmente. Cette conclusion est en accord avec les observations faites en situation quasi statique.

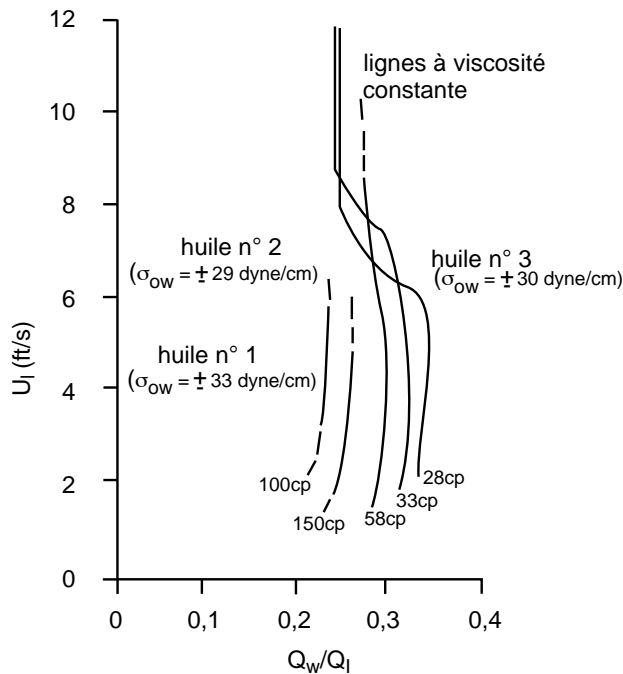


Figure 3  
Fraction critique d'eau à l'inversion d'après Oglesby [8].  
Critical water volume fraction at the point of phase inversion, Oglesby [8].

L'influence de l'énergie apportée au système sur la valeur de la fraction critique, a tout d'abord été mise en évidence par des études quasi statiques [7, 11, 12, 13]. Après avoir introduit dans un agitateur deux fluides en quantité équivalente, les auteurs ont apporté de l'énergie à l'une des deux phases préalablement stratifiée. Ils ont montré que la phase dans laquelle l'énergie est apportée devient généralement la phase continue. Ils ont observé qu'en augmentant la vitesse d'agitation, la fraction critique de la phase dispersée nécessaire à l'inversion devient plus faible. Les limites de la zone

d'ambivalence sont donc aussi fonction de l'énergie apportée au système.

Comme le diamètre caractéristique de la dispersion est lié à l'énergie apportée, il a été choisi, au même titre que celle-ci, pour paramétrer la fraction critique [14, 15, 16]. L'inversion est alors définie comme un équilibre entre la rupture des grosses gouttes engendrée par la turbulence, et la coalescence des plus petites gouttes.

Comme on l'a vu sur la figure 3, la viscosité est le facteur dominant lorsque le régime est supposé être laminaire. Lorsqu'on augmente la vitesse, on observe une transition qui est vraisemblablement liée à l'apparition de la turbulence. L'effet de celle-ci est d'atténuer l'influence de la viscosité : l'inversion devient alors peu sensible aux propriétés physiques des phases. Il est intéressant de noter que la vitesse n'a d'effet qu'à travers la transition de régime d'écoulement [2, 8, 9, 10, 17].

À partir des paramètres influençant l'inversion, des modèles prédisant la fraction de phase critique ont été développés. Il est possible de les regrouper en trois familles :

- les modèles basés sur la vitesse de rotation du mixer ; ils dépendent en général du type de mixer utilisé [6, 11, 12] ;
- les modèles basés sur les propriétés hydrodynamiques et physiques du système étudié [14] ;
- les modèles basés sur les propriétés physiques des fluides.

Ces derniers ont été plus particulièrement développés pour le cas des écoulements en conduite. Les premiers modèles correspondent à des approches empiriques comme celle de Arirachakaran *et al.* [18]. Dans le cas où l'écoulement d'huile est laminaire, ces auteurs ont remarqué que leurs points expérimentaux étaient bien regroupés par une relation de type logarithmique entre la viscosité de l'huile et la fraction d'eau introduite pour déclencher l'inversion. Cette relation a été écrite de telle sorte que pour une viscosité d'huile de 1 cp, l'inversion apparaît pour une fraction d'eau introduite égale à 0,5. La tension interfaciale dans tous les essais étant égale à 0,03 N/m, elle n'a pas été prise en compte dans la relation :

$$r_w = 0,5 - 0,1108 \log \mu_o \quad (1)$$

Pour les approches théoriques, il faut citer celle de Yeh *et al.* [4], basée sur l'étude d'un écoulement d'eau et d'huile, dont les deux phases adjacentes sont non miscibles, newtoniennes, et de densités proches. En supposant que le comportement hydrodynamique du système

est dicté par les effets visqueux et non par les effets d'inertie, l'écriture de l'égalité des cisaillements à l'interface au moment de l'inversion permet aux auteurs d'exprimer le rapport des fractions de phases en fonction du rapport de viscosités. La corrélation peut s'écrire sous la forme :

$$r_o = \frac{\sqrt{\mu_o/\mu_w}}{1 + \sqrt{\mu_o/\mu_w}} \quad (2)$$

Pour améliorer le modèle, l'interface peut être considérée comme une troisième phase, les auteurs proposent alors d'appliquer la théorie dans le plan minimisant l'énergie nécessaire à séparer ou à cisailier deux couches. Cette énergie équivalente au travail d'adhésion, dépend des tensions superficielles des fluides. La tension superficielle de l'eau étant en général plus importante que celle de l'huile, l'énergie sera minimum dans le plan compris entre la couche d'huile et la couche interfaciale. Dans la relation (2), la viscosité de l'eau doit donc être remplacée par la viscosité de la couche interfaciale.

Fréchet [19] suggère une méthode basée sur le second principe de la thermodynamique. Entre deux états homogènes possibles, correspondant soit à une dispersion d'huile dans l'eau, soit à une dispersion d'eau dans l'huile, il montre qu'il existe un état pour lequel l'énergie est plus faible : il suggère que cet état correspond à celui qui est obtenu physiquement. En supposant que l'écoulement de la phase continue est laminaire dans chaque état possible et qu'il n'y a pas de glissement entre la phase dispersée et la phase continue, il montre que la fraction d'huile critique pour laquelle se produit l'inversion est uniquement fonction du rapport des viscosités :

$$r_o = \left\{ 1 + \left( \frac{\mu_w}{\mu_o} \right)^{2/3} \right\}^{-1} \quad (3)$$

Il nous a semblé intéressant d'étendre la théorie de Fréchet au cas des écoulements turbulents. En effet, une telle approche doit permettre de rendre compte des effets du régime d'écoulement observé par Oglesby.

## 1 PRÉDICTION DE L'INVERSION

Avant d'étendre la théorie thermodynamique de l'inversion aux différents régimes d'écoulement, il est nécessaire de préciser le cadre d'hypothèses à l'intérieur duquel cette théorie est acceptable. On s'intéresse

à un petit volume de mélange défini de telle sorte que le diamètre de la dispersion et la distance moyenne entre les gouttes soient petits devant la longueur caractéristique de ce volume. On suppose en outre qu'à cette échelle les vitesses ne varient pas de manière significative et que la différence de vitesse entre phases est négligeable. On peut alors supposer le mélange en équilibre thermodynamique local. Si plusieurs états possibles peuvent exister, celui qui survivra doit minimiser l'énergie. L'état le plus probable est donc celui pour lequel l'enthalpie libre est minimum.

Par conséquent, on est ramené à la détermination de l'enthalpie libre d'une dispersion qui comporte plusieurs contributions, l'enthalpie libre de chaque phase dépendant du volume de celle-ci et l'enthalpie libre de l'interface dépendant de l'aire interfaciale. La détermination de cette enthalpie libre doit être faite pour les deux états possibles, celui où l'huile est dispersée dans l'eau (état 1), celui où l'eau est dispersée dans l'huile (état 2). L'inversion est supposée se produire lorsque ces deux enthalpies sont égales. En raisonnant pour un volume unité de dispersion cette égalité s'écrit entre les états :

$$r_{o1} g_{o1} + r_{w1} g_{w1} + s_1 g_{i1} = r_{o2} g_{o2} + r_{w2} g_{w2} + s_2 g_{i2}$$

où o, w, i sont des indices relatifs aux deux phases et à l'interface,  $r_k$  est la fraction volumique de la phase k, s la surface interfaciale par unité de volume, g, l'enthalpie par unité de volume ou de surface. Sous l'hypothèse de non glissement, les deux états conduisent aux mêmes fractions volumiques ( $r_{k1} = r_{k2}$ ). En outre, la température et la pression étant identiques dans les deux cas, les enthalpies spécifiques sont égales ( $g_{k1} = g_{k2}$ ,  $g_{i1} = g_{i2}$ ). La relation se simplifie et à l'inversion de phase, les deux états doivent correspondre à des aires interfaciales identiques ( $s_1 = s_2$ ). En reliant l'aire interfaciale spécifique au diamètre de Sauter de la dispersion  $d_k$ , il en découle  $s_1 = 6r_o/d_o$  et  $s_2 = 6r_w/d_w$ . L'égalité des surfaces conduit à l'expression de la fraction d'huile critique :

$$r_o = (1 + d_w/d_o)^{-1} \quad (4)$$

Cette fraction est liée à la taille des gouttes pour chaque état possible et donc au mécanisme qui contrôle la fragmentation des interfaces. Hinze [20] a montré qu'il peut exister plusieurs mécanismes. Lorsque l'écoulement est laminaire, le diamètre est contrôlé par la contrainte de cisaillement de la phase continue. En présence de turbulence, c'est son énergie qui fragmente la dispersion. Trois situations sont alors envisageables :

- les deux états possibles sont laminaires ;
- les deux états possibles sont turbulents ;

– l'un des états est laminaire (lorsque la phase continue est la plus visqueuse) et l'autre état est turbulent.

Fréchetou a limité son étude au premier cas que l'on rappellera ci-dessous. L'étude sera ensuite complétée pour les deux derniers états cités.

### 1.1 L'écoulement dans la phase continue reste laminaire à l'inversion

Hinch et Acrivos [21] ont proposé une loi de rupture pour des gouttes qui se trouvent dans une déformation pure en écoulement laminaire :

$$\mu_c S d / \sigma = 0,145 (\mu_d / \mu_c)^{-1/6} \quad (5)$$

où  $c$  et  $d$  sont relatifs aux phases continue et dispersée,  $S$  la vitesse de déformation,  $\mu$  la viscosité,  $d$  le diamètre des gouttes, et  $\sigma$  la tension interfaciale. En écoulement laminaire en conduite, la vitesse de déformation  $S$  s'exprime en fonction du gradient de vitesse. Elle varie avec la position radiale. Sa valeur maximum est prise près de la paroi  $S = 2U/D$ . En supposant que les gouttes sont calibrées dans cette région de l'écoulement, la relation (2) devient finalement :

$$\frac{d}{D} = \frac{0,145}{2} \frac{\sigma}{\mu_c U_1} (\mu_d / \mu_c)^{-1/6} \quad (6)$$

On notera que  $d/D$  doit être inférieur à 1. Dans le cas contraire, la dispersion ne peut pas survivre : on peut suggérer que les phases se séparent et s'écoulent séparément.

En remplaçant dans (4), on retrouve le titre volumique établi par Fréchetou :

$$r_o = \left\{ 1 + \left( \frac{\mu_w}{\mu_o} \right)^{2/3} \right\}^{-1} \quad (7)$$

Il est remarquable de noter que cette relation ne dépend que du rapport des viscosités, comme la relation de Yeh *et al.* dont elle est proche.

### 1.2 L'écoulement dans la phase continue reste turbulent à l'inversion

La détermination du diamètre de la dispersion s'appuie sur la relation de la rupture développée par Hinze ; il a suggéré que les inclusions étaient déformées par les fluctuations de pression dues à la turbulence et que

l'inclusion était ramenée à la sphéricité par la tension superficielle. En recherchant un équilibre entre les tourbillons les plus dangereux et la force de rappel due à la tension superficielle, il a montré que le diamètre critique est exprimé en fonction d'un nombre de Weber critique bâti sur la dissipation d'énergie cinétique turbulente  $\varepsilon$  :

$$We_{crit} = C_1 \rho_c \frac{\varepsilon^{2/3} d_{max}^{5/3}}{\sigma} \quad (8)$$

La théorie, valable pour des diamètres d'inclusion de taille comparable à celle des tourbillons de la gamme inertielle, a été confirmée expérimentalement par Sevik et Park [22].

Dans le cas d'un écoulement en conduite, il reste à calculer la dissipation moyenne. Cette dissipation est liée au travail des forces de frottement à la paroi et à l'interface, lorsqu'on se déplace avec la dispersion, comme le montre l'expression de Colin [23]. Avec l'hypothèse de non-glissement, le travail à l'interface devient négligeable et la dissipation par unité de volume est proportionnelle au travail de la force de frottement à la paroi  $4\tau U/D$ , où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement pariétale. Sur cette dernière, peu d'information existe actuellement en diphasique, surtout lorsque la phase dispersée est majoritaire en volume. On supposera cependant qu'elle peut être prédite par une loi monophasique de la forme  $\tau = f\rho U^2/2$ , où  $f$  est le coefficient de frottement provenant de la relation de Blasius  $f = 0,079 Re^{-0,25}$ . La dissipation devient :

$$\varepsilon_c = \frac{1}{r_c} \left\{ \frac{2}{D} f_c U^3 \right\} \quad (9)$$

En reportant dans l'équation (8), on en déduit l'expression du diamètre de Sauter de la dispersion à l'équilibre :

$$\frac{d}{D} = \frac{1,15}{2^{2/5}} \left( \frac{r_c}{f_c} \right)^{2/5} \left( \frac{\sigma}{U^2 D \rho_c} \right)^{3/5} \quad (9)$$

En écrivant la relation (4) sous sa forme initiale  $r_o/d_o = r_w/d_w$ , on trouve l'expression du diamètre de Sauter critique :

$$r_o = \left\{ 1 + \left( \frac{\mu_w}{\mu_o} \right)^{1/14} \left( \frac{\rho_w}{\rho_o} \right)^{5/14} \right\}^{-1} \quad (10)$$

Dans ce cas, la fraction critique dépend du rapport des masses volumiques et beaucoup plus faiblement du rapport des viscosités.

### 1.3 L'écoulement dans la phase continue change de régime à l'inversion

Dans les expériences visant à caractériser l'inversion de phase, l'huile est toujours plus visqueuse que l'eau. Si l'écoulement est turbulent quand l'eau est la phase continue et s'il est laminaire lorsque c'est l'huile, les diamètres de dispersion sont respectivement :

$$\frac{d_o}{D} = \frac{1,15}{2^{2/5}} \left(\frac{r_w}{f_w}\right)^{2/5} \left(\frac{\sigma}{U^2 D \rho_w}\right)^{3/5} \text{ et } \frac{d_w}{D} = \frac{0,145}{2} \frac{\sigma}{U \mu_o} \left(\frac{\mu_w}{\mu_o}\right)^{-1/6}$$

En égalant les deux enthalpies interfaciales, l'équation régissant le titre volumique d'huile devient :

$$\frac{(1 - r_o)^{7/5}}{r_o} = \frac{0,145}{1,15 \cdot 2^{3/5}} (\sigma \cdot f_w)^{2/5} (D \cdot \rho_w)^{3/5} \frac{U^{1/5}}{\mu_o^{5/6} \cdot \mu_w^{1/6}} \quad (11)$$

Par un calcul itératif il est alors possible de déduire le titre volumique d'huile.

## 2 VALIDATION DU MODÈLE

Afin de valider le modèle, on a rassemblé les données disponibles de la littérature. Comme cette étude est appliquée aux écoulements dispersés en conduite, on n'a pas retenu les données obtenues en systèmes agités. Les banques sont présentées dans les tableaux 1 et 2. Seules les données où les propriétés physiques des fluides, le diamètre de la conduite et la vitesse du mélange liquide lors de l'inversion de phase sont fournis, ont été retenues.

Ces données ont été regroupées de manière à conserver l'esprit du modèle, c'est-à-dire en fonction du régime de la dispersion avant et après l'inversion. Il est vraisemblable que tous les écoulements présentés soient turbulents lorsque l'eau est la phase continue. Lorsque l'huile est la phase continue, l'écoulement peut être turbulent (tableau 2) ou laminaire (tableau 1).

Le phénomène d'inversion de phase a principalement été étudié pour des écoulements diphasiques eau-huile et il a été visuellement constaté dans plusieurs études sur des écoulements triphasiques en conduite [17, 24, 25, 26]. Son étude est donc un point important pour la modélisation de ces écoulements. La validation des modèles dans ce cas est pourtant impossible à réaliser. En effet, l'inversion n'étant que visuellement observée, les auteurs ne fournissent pas systématiquement les propriétés physiques des fluides, les fractions volumiques et la vitesse du mélange liquide à l'inversion. Actuellement, les modèles ne peuvent donc pas être testés sur des expériences triphasiques.

La banque de données est principalement composée d'écoulements horizontaux car peu de données utilisables ont été trouvées sur les écoulements verticaux [1].

### Comparaison des résultats avec la théorie

L'étude sur les données diphasiques montre que lorsque la dispersion reste turbulente après l'inversion de phase (fig. 4), d'une manière générale, le modèle tend à sous-estimer la valeur de la fraction volumique d'huile nécessaire à l'inversion, alors que le modèle de

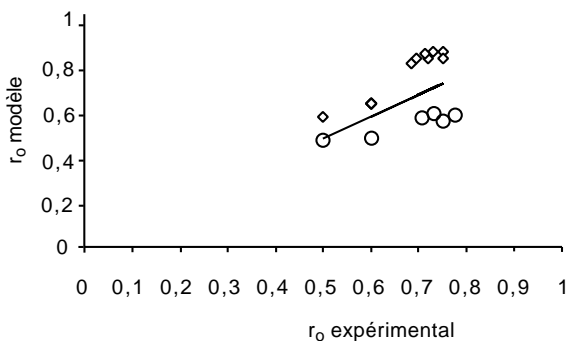


Figure 4

Prédiction du titre volumique d'huile à l'inversion pour un écoulement turbulent/turbulent ; O corrélation (10) ;  $\diamond$  modèle de Yeh.

Prediction of the oil volume fraction at the inversion point for a turbulent/turbulent flow; O correlation (10);  $\diamond$  correlation of Yeh.

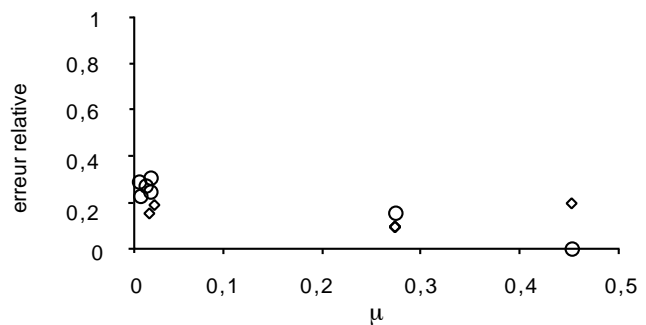


Figure 5

Erreur relative du modèle en fonction du rapport des viscosités  $\mu = \mu_w / \mu_o$  pour un écoulement turbulent/turbulent ; O corrélation (10) ;  $\diamond$  modèle de Yeh.

Relative error versus viscosity ratio for turbulent/turbulent flow; O correlation (10);  $\diamond$  correlation of Yeh.

TABLEAU 1  
Écoulement diphasique, eau turbulent, huile laminaire  
*Two-phase flow, turbulent water flow, laminar oil flow*

AUTEUR	penne	D m	$\mu_o$ Pa.s	$\rho_o$ kg/m <sup>3</sup>	$\mu_w$ Pa.s	$\rho_w$ kg/m <sup>3</sup>	$\sigma_{ow}$ N/m	VL m/s	Reo	Rew	ro
[8]	H	0,04	0,15	859	0,001	1000	0,04	0,67	156	23478	0,72
		0,04	0,16	859	0,001	1000	0,04	0,98	213	32907	0,76
		0,04	0,14	859	0,001	1000	0,04	0,88	228	29822	0,75
		0,04	0,17	859	0,001	1000	0,04	1,10	232	37020	0,76
		0,04	0,14	859	0,001	999	0,04	1,13	279	40121	0,74
		0,04	0,15	859	0,001	1000	0,04	1,43	331	49973	0,7
		0,04	0,05	859	0,001	997	0,03	0,85	572	39655	0,76
		0,04	0,10	859	0,001	1000	0,04	1,43	500	50158	0,78
		0,04	0,06	859	0,001	998	0,03	1,43	847	63605	0,705
		0,04	0,05	859	0,001	998	0,03	1,40	1063	60138	0,7
		0,04	0,03	859	0,001	996	0,03	0,85	930	41012	0,69
		0,04	0,03	859	0,001	996	0,03	1,43	1723	71171	0,66
[1]	V	0,03	0,02	851	0,001	999	0,05	0,09	102	2322	0,95
[9]	H	0,03	0,18	857	0,001	998	0,03	1,50	185	40251	0,7
		0,03	0,18	857	0,001	998	0,03	2,25	278	60376	0,7
		0,03	0,18	857	0,001	998	0,03	2,97	366	79642	0,7
		0,03	0,13	846	0,001	996	0,03	1,52	248	45577	0,7
		0,03	0,13	846	0,001	996	0,03	2,29	375	68907	0,75
		0,03	0,13	846	0,001	996	0,03	3,07	503	92417	0,75
		0,03	1,45	886	0,001	998	0,03	1,51	23	40438	0,85
		0,03	1,45	886	0,001	998	0,03	2,26	35	60617	0,85
		0,03	0,99	879	0,001	996	0,03	1,52	34	45607	0,85
		0,03	0,99	879	0,001	996	0,03	2,28	51	68396	0,85
[10]	H	0,03	0,35	867	0,001	1000	0,04	0,76	50	16702	0,75
		0,03	0,31	867	0,001	1000	0,04	1,51	113	33404	0,75
		0,03	0,28	867	0,001	1000	0,04	2,27	184	50107	0,75
		0,03	0,27	867	0,001	1000	0,04	3,02	259	66809	0,75
		0,03	0,24	867	0,001	1000	0,04	3,86	379	85400	0,9
		0,03	0,25	864	0,001	999	0,04	0,75	68	18782	0,7
		0,03	0,22	864	0,001	999	0,04	1,50	156	37564	0,7
		0,03	0,21	864	0,001	999	0,04	2,26	251	56346	0,7
		0,03	0,20	864	0,001	999	0,04	3,01	352	75128	0,7
		0,03	0,20	861	0,001	998	0,04	3,77	441	105947	0,7
		0,03	0,17	861	0,001	998	0,04	0,75	103	21189	0,7
		0,03	0,15	861	0,001	998	0,04	1,51	225	42379	0,7
		0,03	0,15	861	0,001	998	0,04	2,26	356	63568	0,7
		0,03	0,13	861	0,001	998	0,04	3,04	535	85406	0,75
		0,03	0,12	861	0,001	998	0,04	3,83	760	107580	0,8
		0,03	0,11	861	0,001	998	0,04	4,48	906	125761	0,85
		0,03	0,15	858	0,001	996	0,04	4,54	709	142845	0,7
		0,03	0,13	858	0,001	996	0,04	0,76	132	23807	0,7
		0,03	0,12	858	0,001	996	0,04	1,51	276	47615	0,7
		0,03	0,12	858	0,001	996	0,04	2,27	425	71422	0,7
		0,03	0,12	858	0,001	996	0,04	3,02	577	95230	0,7
		0,03	0,09	858	0,001	996	0,04	3,84	935	120898	0,8
		0,03	0,08	858	0,001	996	0,04	4,49	1218	141346	0,85

TABLEAU 2  
Écoulement diphasique, eau turbulent, huile turbulent  
*Two-phase flow, turbulent water flow, turbulent oil flow*

AUTEUR	penne	D m	$\mu_o$ Pa.s	$\rho_o$ kg/m <sup>3</sup>	$\mu_w$ Pa.s	$\rho_w$ kg/m <sup>3</sup>	$\sigma_{ow}$ N/m	VL m/s	Reo	Rew	ro
[17]	H	0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	1,45	9289	41091	0,6
		0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	1,29	8256	36525	0,6
		0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	1,13	7224	31959	0,6
		0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	0,97	6192	27394	0,6
		0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	0,81	5160	22828	0,6
		0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	0,65	4128	18262	0,6
		0,04	0,0049	825	0,001	1000	<b>0,03</b>	0,48	3096	13697	0,6
[8]	H	0,04	0,07	859	0,001	998	0,03	1,95	1047	81747	0,75
		0,04	0,06	859	0,001	998	0,03	1,89	1136	83904	0,72
		0,04	0,05	859	0,001	996	0,03	1,86	1410	91356	0,7
		0,04	0,07	859	0,001	997	0,03	2,50	1178	117447	0,75
		0,04	0,06	859	0,001	998	0,03	2,44	1466	107028	0,73
		0,04	0,05	859	0,001	997	0,03	2,47	1688	116015	0,72
		0,04	0,07	859	0,001	998	0,03	3,66	1876	151496	0,75
		0,04	0,03	859	0,001	996	0,03	2,07	2332	99601	0,72
		0,04	0,03	859	0,001	996	0,03	2,01	2506	102162	0,685
		0,04	0,03	859	0,001	996	0,03	2,16	2695	109902	0,74
		0,04	0,03	859	0,001	997	0,03	2,44	2501	115875	0,695
		0,04	0,03	859	0,001	996	0,03	2,47	2691	119970	0,75
[24]	H	0,04	0,00	840	0,001	1000	0,02	0,45	4801	12637	0,5

Yeh la surestime. La corrélation (10) semble mieux prédire l'inversion lorsque celle-ci se produit pour des faibles fractions d'huile critiques. La figure 5 exprime l'erreur relative,  $\frac{|r_o(\text{expérimental}) - r_o(\text{modèle})|}{r_o(\text{expérimental})}$  en fonc-

tion du rapport des viscosités  $\mu = \mu_w/\mu_o$ . Elle montre que le modèle rend d'autant mieux compte des tendances observées que le rapport des viscosités est grand. En effet, il apparaît sur la relation (10) que lorsque ce rapport est grand, le titre d'huile est faible, on se retrouve alors dans la configuration où le modèle est satisfaisant.

Dans le cas où le régime de l'écoulement est supposé changer au moment de l'inversion, la figure 6 montre que pour la plupart des points, la corrélation (11) prédit relativement bien la position du point d'inversion. L'erreur relative présentée en figure 7 fait ressortir l'influence de la viscosité sur la qualité de la réponse du modèle. Le modèle donne d'autant plus satisfaction que l'huile est plus visqueuse. La comparaison avec le modèle de Yeh, montre une amélioration vis à vis de ce dernier dans le cas où l'huile devient plus visqueuse.

La comparaison du modèle vis-à-vis des données expérimentales peut être considérée satisfaisante, malgré l'erreur parfois importante sur certains points. En effet, il faut tout d'abord rappeler que l'inversion est souvent repérée visuellement, or il s'agit d'un phénomène très rapide qui se déclenche brusquement. La méthode visuelle peut donc paraître peu précise. Certains auteurs préfèrent définir les conditions expérimentales d'apparition de l'inversion, en se fiant au pic de gradient de pression. Or une étude récente de Pan en écoulement triphasique, a montré que tous les écoulements, où le gradient de pression est maximum, sont tels que l'huile est la phase continue, alors que ceux, où ce gradient est minimum, ont pour phase continue l'eau. Ceci est visible sur la figure 1, où les définitions des configurations triphasiques tiennent compte de trois informations : phase continue (eau « W » ou huile « O ») — configuration liquide/liquide (dispersé « D » ou stratifié « S ») — configuration gaz/mélange liquide. Il en a conclu que le point d'inversion se situe dans une région limitée par le maximum et le minimum de gradient de pression. L'auteur a remarqué aussi que ce phénomène est très



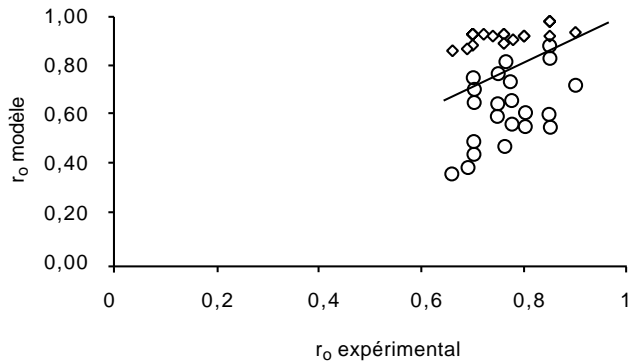


Figure 6

Prédiction du titre volumique d'huile à l'inversion pour un écoulement laminaire/turbulent ; O corrélation (11) ; ◇ modèle de Yeh.

*Prediction of the oil volume fraction at the inversion point for a laminar/turbulent flow; x correlation (11); ◇ correlation of Yeh.*

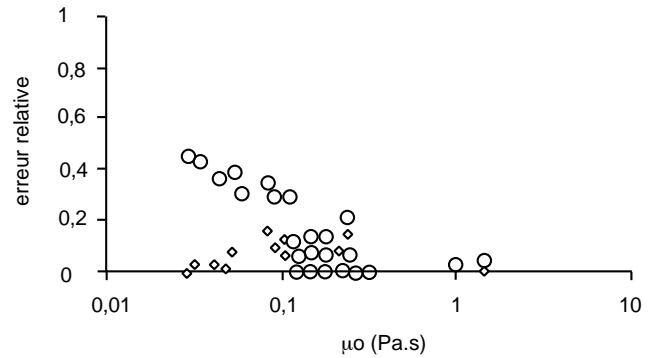


Figure 7

Erreur relative du modèle en fonction de la viscosité de l'huile pour un écoulement laminaire/turbulent ; O corrélation (11) ; ◇ modèle de Yeh.

*Relative error versus oil viscosity for laminar/turbulent flow; x correlation (11); ◇ correlation of Yeh.*

instable, il lui a été en effet difficile de reproduire l'inversion pour des conditions initiales identiques. Il semble donc ressortir de son étude qu'il est difficile de situer précisément la position de l'inversion (fraction de phase critique unique) pour un système donné.

Ces remarques nous amènent donc à penser que l'erreur sur les fractions de phases critiques expérimentales, peut être parfois importante.

## CONCLUSION

Un modèle prédisant le point d'inversion de phase dans un écoulement diphasique liquide-liquide a été développé. Ce modèle a été testé par rapport à des données expérimentales fournies par la bibliographie. Il faut noter que la soudaineté et la rapidité de ce phénomène le rendent difficile à déterminer précisément de manière visuelle dans une conduite lorsque les conditions opératoires changent. La majorité des auteurs préfèrent donc se fier à l'apparition d'un pic du gradient de pression pour déterminer les conditions expérimentales à l'inversion. L'étude de Pan a montré que ce pic ne situe pas précisément la position de l'inversion (fraction critique de phase), mais définit plutôt un voisinage de celle-ci. Il a aussi constaté que le phénomène d'inversion n'est pas facilement reproductif. En effet, pour des conditions initiales identiques, le changement de configuration peut ou non apparaître. C'est pourquoi, malgré l'erreur relative parfois importante, les tests effectués sur des écoulements dont le régime de la phase continue change ou se maintient sont satisfaisants.

Afin de mieux maîtriser ce phénomène d'inversion de phase, d'autres études expérimentales en conduite devraient être menées pour définir plus précisément l'influence du diamètre, de la vitesse du mélange et des propriétés physiques sur la fraction de phase provoquant l'inversion. L'interaction entre le maximum de gradient de pression et ce phénomène mérite aussi d'être éclaircie.

## NOMENCLATURE

### Indices

k	indice de phase (o : l'huile, w : l'eau)
c	repère la phase continue
d	repère la phase dispersée

### Grandeurs physiques

d	diamètre de la dispersion
D	diamètre de la conduite
$f_c$	coefficient de frottement pariétal de la phase continue
$g_{ik}$	enthalpie libre de l'interface
$g_k$	enthalpie libre de la phase k
$Q_k$	débit d'entrée de la phase k
$Re_c = \frac{UD}{\nu_c}$	nombre de Reynolds basé sur la phase continue
$r_k$	fraction volumique de la phase k
s	surface interfaciale par unité de volume
S	vitesse de déformation de la phase continue

U	vitesse moyenne du mélange liquide
$\sigma_{jk}$	tension superficielle entre les phases j et k
$\rho_k, \nu_k$	masse volumique et viscosité cinématique de la phase k
$\mu_k$	viscosité dynamique de la phase k.

## RÉFÉRENCES

- Govier G.W., G.A. Sullivan et R.K. Wood, (1961), The upward vertical flow of oil-water mixtures. *Canadian J. Chem. Eng.*, **67**.
- Shean A.R. (1976), Pressure drop and phase fraction in oil-water-air vertical pipe flow. *M. Sc. Thesis MIT*.
- Pan L. (1996), High pressure three-phase (gas/liquid/liquid) flow. *PhD Thesis*, université de Londres.
- Yeh G.C., F.H. Haynie et R. Moses (1964), Phase-volume relationship at the point of phase inversion in liquid dispersions. *AIChE journal*, **10**, 2, 260-65.
- Selker A.H. et C.A. Sleicher (1965), Factors affecting which phase will disperse when immiscible liquids are stirred together. *Canadian J. Chem Eng.*, **43**, 298-301.
- Luhning R.W. et H. Sawistowski (1971), Phase inversion in stirred liquid-liquid systems. *ISEC, Session 5A*, 136, 51.
- Mc Clarey M. et G.A. Mansoori (1978), Factors affecting the phase inversion of dispersed immiscible liquid-liquid mixtures. *AIChE Symposium Series*, **74**, 173, 134-39.
- Oglesby K.D. (1979), An experimental study on the effect of oil viscosity, mixture velocity and water fraction on horizontal oil-water flow. *M. Sc. Thesis*, université de Tulsa.
- Arirachakaran S. (1983), An experimental study of two-phase oil-water flow in horizontal pipes. *M. Sc. Thesis*, université de Tulsa.
- Martinez A.E. (1986), The flow of oil-water mixtures in horizontal pipes. *M. Sc. Thesis*, université de Tulsa.
- Quinn J.A. et D.B. Sigloh (1963), Phase inversion in the mixing of immiscible liquids. *Canadian J. Chem Eng.*, **41**, 15-18.
- Arashmid M. et G.V. Jeffreys (1980), Analysis of the phase inversion characteristics of liquid-liquid dispersions. *AIChE Journal*, **26**, 1, 51-55.
- Guillinger T.R., A.K. Grislingas et O. Erga (1988), Phase inversion behavior of water-kerosene dispersions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 978-82.
- Tidhar M., J.C. Merchuk, A.N. Sembira et D. Wolf (1986), Characteristics of a motionless mixer for dispersion of immiscible fluids. Phase inversion of liquid-liquid systems. *Chem. Eng. Science*, **41**, 3, 457-62.
- Gilchrist A., K.N. Dyster, I.P.T. Moore, A.W. Nienow et K.J. Carpenter (1989), Delayed phase inversion in stirred liquid-liquid dispersions. *Chem. Eng. Science*, **44**, 10, 2381-84.
- Kumar S., R. Kumar et K.S. Gandhi (1991), Influence of the wetting characteristics of the impeller on phase inversion. *Chem. Eng. Science*, **46**, 9, 2365-67.
- Laflin G.C. et K.D. Oglesby (1976), An experimental study on the effects of flow rate, water fraction and gas-liquid ratio on air-oil-water flow in horizontal pipes. *M. Sc. Thesis*, université de Tulsa .
- Arirachakaran S., K.D. Oglesby, M.S. Malinowsky, O. Shoham et J.P. Brill (1989), An analysis of oil/water flow phenomena in horizontal pipes. *SPE* 18836, 155-67.
- Frechou D. (1986), Étude de l'écoulement ascendant à trois fluides en conduite verticale. *Thèse de l'Institut polytechnique de Toulouse*.
- Hinze J.O. (1955), Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *AIChE Journal*, **1**, 289-95.
- Hinch E.J. et A. Acrivos (1979), Steady long slender droplets in two-dimensional straining motion. *AIChE journal*, **1**, 289-295.
- Sevik et S.H.M. Park (1973), The splitting of drops and bubbles by turbulent fluid flow. *J. Fluids Eng.*, **95**, 53-62.
- Colin C. (1990), Écoulement diphasique à bulles et à poches en micropesanteur. *Thèse de l'Institut polytechnique de Toulouse*.
- Malinowsky M.S. (1975), An experimental study of oil-water and air-oil-water flowing mixtures in horizontal pipes. *M. Sc. Thesis*, université de Tulsa.
- Fabre J., D. Frechou, L. Masbernat et L. Peresson (1983), Structure et modélisation d'écoulements multi-fluides en conduites verticales. *Rapport IFP* 7118.
- Acikgoz M., F. Franca et R.T. Lahey (1992), An Experimental study of three-phase flow regimes. *Int. J. Multiphase Flow*, **18**, 3, 327-36.

Manuscrit définitif reçu en juin 1997