
Configurations d'écoulement gaz-liquide

Gas/liquid flow configurations

Jacques Bonnin* et Jean-Michel Fitremann**

Dans le cadre des activités du Groupe de Travail "Écoulements Polyphasiques" de la Société Hydrotechnique de France, un certain nombre de réflexions sur le problème des configurations d'écoulements diphasiques gaz-liquide sont présentées en vue de guider d'éventuels travaux spécifiques sur ce sujet. Les auteurs ont animé ces discussions avec la participation de plusieurs industriels et présentent ce résumé des travaux.

Les études théoriques et expérimentales des écoulements diphasiques ont une application immédiate au fonctionnement des réacteurs nucléaires, à l'extraction et au transport des hydrocarbures, au génie chimique, etc. Les écoulements présentent des aspects géométriques des interfaces variés selon les conditions de l'écoulement et la nature des fluides. La description précise de ces configurations et de leurs domaines d'existence est difficile, mais nécessaire pour la prévision et le calcul des écoulements.

Classifications proposées des configurations d'écoulement

Une liste de configurations de complexité croissante a été indiquée par M. Bonnin [1] sur des bases topologiques. Dans le même ordre d'idée M. Fitremann [2] utilise une méthode combinatoire pour décrire les diverses configurations à partir de géométries élémentaires. Cette méthode peut se révéler intéressante pour fabriquer des modèles élémentaires et obtenir la similitude par décomposition de la géométrie de l'écoulement en configurations plus simples. Voir figures 1 et 2 extraites de [1].

(*) E.D.F. Direction des Etudes et Recherches, 6, Quai Watier, 78400 CHATOU

(**) D.I.P. Laboratoire de Mécanique Expérimentale des Fluides, Bât. 502, 91 405 ORSAY.

Analyse paramétrique et similitude

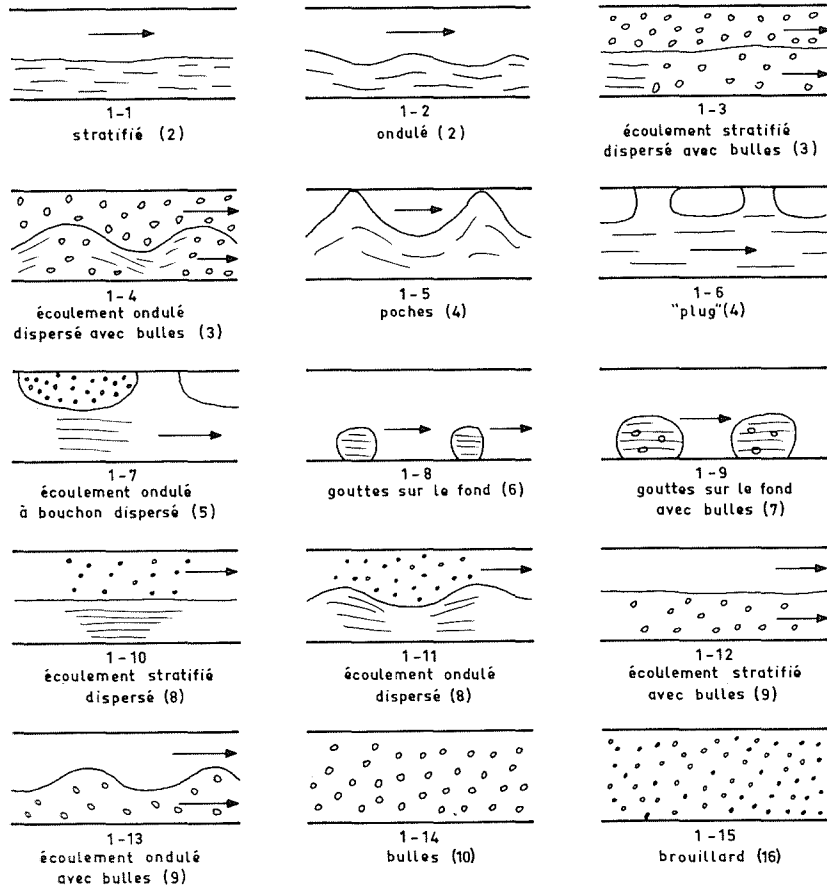
Les paramètres de similitude indépendants essentiels sont décrits dans [1] et [2] pour les cas d'un écoulement en canal avec transfert de masse et sont au nombre de 8. Des raisons physiques tenant aux cas d'application les plus usuels permettent de penser qu'une réduction est possible, typiquement de 8 à 4 ou 5 selon les cas. Il convient toutefois de remarquer que cette réduction ne peut pas être universelle (ex : écoulements annulaires à gouttelettes vertical : 6 paramètres dans le modèle décrit dans [2]). De plus, la coalescence joue un rôle important dans l'établissement de certaines configurations (transition bulles → poches par exemple) et un paramètre supplémentaire décrivant ce phénomène est indispensable.

Méthodes d'investigation

A l'aide de capteurs sensibles à un domaine ponctuel ou étendu de l'espace (sur une corde de la section, une section ou un volume d'écoulement), les chances d'identifier à coup sûr une configuration donnée varient selon l'emplacement du ou des capteurs, leur nombre et l'inclinaison de la conduite. On a dressé un tableau des possibilités des différentes méthodes de diagnostic en donnant une côte d'intérêt pour chaque méthode et type d'écoulement à détecter.

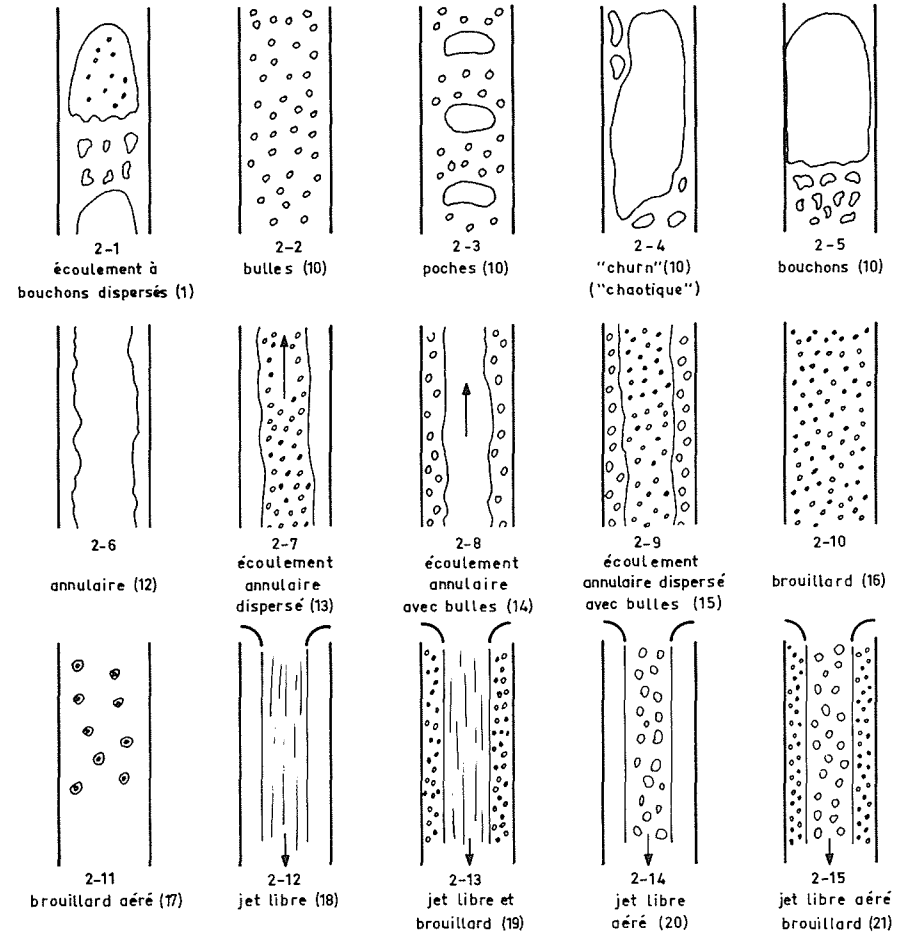
Le tableau I donne les possibilités de détection d'une configuration en fonction du type de méthode choisi et surtout de l'étendue du volume de mesure. Le tableau II donne des renseignements complémentaires pour des méthodes d'intercorrélation au sens large.

Pour le détail des méthodes de mesure, on pourra consulter le travail du séminaire "Métrologie des Ecou-



Les numéros entre parenthèses renvoient à ceux du tableau I

Figure 1 – Configuration d'écoulements diphasiques liquide-gaz



Les numéros entre parenthèses renvoient à ceux du tableau I

Figure 2 – Configuration d'écoulements diphasiques liquide-gaz (suite).

Tableau I								
Type de mesure	Méthode ou procédé	Caractéristiques physiques principales	Grandeur mesurée	Cas d'application possible de la méthode	Configurations discernables	Remarques	Côte	
Intégrales de volume et assimilées \mathcal{V} ou $\mathcal{S} \times \mathcal{L}$	Vannes rapides	$\tau \sim 1\text{ms}$ $L \gtrsim D$	Taux de présence moyen	Détection de bouchons possible Vertical, Horizontal	Bouchons \leftrightarrow Homogène	Méthode lourde	*	
	Débitmétrie (Moulinet)	variées	vitesse ou débit	Vertical, (Horizontal ?)	Bouchons \leftrightarrow bulles Bouchon \leftrightarrow stratifié	Essai à faire en régimes bouchon (section totale ou partielle)	*	
	Débitmétrie Electromagnétique	$L \sim D$	\sim débit	Vertical Horizontal	Bouchons \leftrightarrow bulles Bouchons \leftrightarrow annulaire Bouchons \leftrightarrow Stratifié \leftrightarrow vagues ($\lambda \sim D$)		** **	
	Célérité du "son"	$L \gg D$	intégrale pondérée	Vertical Horizontal	Stratifié \leftrightarrow Bulles \leftrightarrow Bouchons (?)		* **	
Intégrales de surface (section) \mathcal{S}	Absorption	X	taux de présence moyen sur la section et sur le temps τ	Vertical	Poches \leftrightarrow Bulles (faible épaisseur) Bouchons \leftrightarrow Film \leftrightarrow Film ondulé	Limites τ selon la puissance de source. Difficultés en paroi épaisse	**	
		γ β, n		Horizontal				
		micro-ondes					à essayer	?
		optique			Horizontal	Stratifié		*
		Diffusion Diffraction				Gouttelettes	Eau, Vapeur	*
Intégrales Linéaires \mathcal{L}	Mêmes méthodes			Vertical		= une ou deux cordes orthogonales choix judicieux des cordes	**	
	que pour \mathcal{S}			Horizontal				
Sondes Locales $\delta \mathcal{V}$	Présence de phase	$L \sim 25 \mu\text{m}$	Présence locale instantanée	Vertical Horizontal	Bulles \leftrightarrow Bouchons \leftrightarrow Films \leftrightarrow Gouttes (grosses)	Associé à une mesure de vitesse : spectre de dimensions	***	
	Température	$L \sim 100 \mu\text{m}$	Température locale instantanée	Vertical Horizontal		Eau, Vapeur	*	
	Absorption/Faisceaux croisés	$L \sim 50 \mu\text{m}$	Densité locale instantanée	Vertical, Horizontal	Microgouttes	Eau, Vapeur. Se rapproche d'intercorrélation de sondes type	*	
	Sonde électromagnétique	$L \sim$ qqes mm	\sim vitesse locale instantanée	Vertical, Horizontal	Bulles \leftrightarrow Bouchon \leftrightarrow Stratifié \leftrightarrow Gouttes		**	
Sondes pariétales $\delta \mathcal{S}$	Prise de pression Capteur affleurant	$L \sim 0,2 \text{ mm}$ $\tau \sim 1 \text{ ms}$ $L \sim 3 \text{ mm}$	pression à la paroi	Vertical Horizontal	Bulles \leftrightarrow Bouchon Bouchon \leftrightarrow Annulaire Bouchons \leftrightarrow Stratifié		**	
	Présence de phase pariétale	$L \sim 0,1 \text{ mm}$	présence de phase interne	Vertical Horizontal	Films Bouchons	Sondes à la paroi supérieure	***	
	Sonde électromagnétique	$L \sim$ qqes mm	Vitesse dans la couche limite	Vertical Horizontal	Films Bouchons		** **	
	Frottement pariétal	$L \sim 0,1 \text{ mm}$	Gradient de vitesse à la paroi	Vertical Horizontal	Bulles \leftrightarrow Bouchons \leftrightarrow Films	Distingue le sens de l'écoulement	***	

Tableau II		Intérêt des mesures par corrélation spatiale ou temporelle de deux sondes		
\mathcal{V}	\mathcal{S}	\mathcal{L}	$\delta \mathcal{V}$	$\delta \mathcal{S}$
$\mathcal{V} \rightarrow 0$		* qualification possible de méthodes globales de recherche de configuration dans certains cas		
$\mathcal{S} \rightarrow$	** étude des écoulements à forte variation axiale des propriétés ** Holographie	* qualification de certaines cordes privilégiées pour les méthodes par absorption	* qualification possible de méthodes globales	** caractérisation de la configuration à bouchons en écoulement non-vertical
	$\mathcal{L} \rightarrow$	*** choix de deux cordes pour écoulements non verticaux *** méthode à deux longueurs d'onde pour analyser des écoulements à bouchons	*** étalonnage de sondes locales	
		$\delta \mathcal{V} \rightarrow$	*** granulométrie, vitesse de transit des interfaces	*** caractérisation des interfaces et de leur géométrie possible *** distinction entre vagues et bouchons en horizontal
			$\delta \mathcal{S} \rightarrow$	*** vitesses de transit des interfaces *** études des films minces *** distinction de la configuration bouchons en horizontal

lements Diphasiques – S.H.F.” décrit par ailleurs dans cette revue.

L'analyse de l'aspect géométrique d'une configuration complexe (bouchons et bulles, brouillard et vagues, etc.) ne peut se faire que par une analyse statistique des signaux de sondes. En conséquence, la limite entre deux configurations n'a pas un caractère purement déterministe et doit (dans la plupart des cas) être définie par une notion de probabilité d'obtenir telle ou telle valeur géométrique d'une dimension caractéristique des interfaces. Cette approche est indispensable dans toute étude de transition de configurations (ex. [3]).

Domaines d'intérêt

Dans le souci de limiter le volume des études à entreprendre tout en restant dans le domaine des applications les plus fréquentes, des intervalles de variation des paramètres physiques dimensionnels ont été proposés (cf. tableau III). Les investigateurs pourront dans un premier temps chercher à éliminer les groupements adimensionnels les moins influents et en déduire le domaine d'intérêt sous forme non-dimensionnelle.

Considérations sur les installations

La configuration se produisant dans une conduite peut être sensible aux conditions d'entrée-sortie. Un

certain nombre de précautions sont donc indispensables pour assurer la validité des résultats et leur transposition éventuelle à d'autres installations. Une liste de recommandations a été établie afin que les conditions expérimentales soient fixées en vue de cette validation.

1 – Contrôler les effets d'entrée. L'établissement de conditions d'écoulement peu évolutives nécessite dans les meilleurs cas (vertical, haute pression) des longueurs de 100 diamètres au moins, dans les cas usuels (horizontal, vertical, basse pression) cette longueur peut atteindre 500 à 1000 diamètres.

Il est nécessaire de contrôler l'évolution des propriétés en fonction de l'abscisse.

2 – Conditions d'injection. Pour diminuer les longueurs d'établissement, on a intérêt à choisir un mode d'injection adapté. Il est donc indispensable de disposer d'au moins un autre mode d'injection très différent afin de vérifier la sensibilité du régime ou de la transition au mode d'injection.

3 – Oscillations d'installation. Le découplage des conditions d'entrée-sortie est nécessaire pour obtenir les configurations se produisant dans des conditions "naturelles". On doit avoir soin de réguler les débits à l'injecteur de façon correcte (blocage sonique, fortes pertes de charge, régulation) et de minimiser les fluctuations des pertes de charge singulière dans les organes de sortie (séparateurs spéciaux pour écoulements à bouchons, décantation, etc. . .).

4 – Propriétés des fluides. On doit s'efforcer si possible de contrôler l'effet de la contamination des inter-

Tableau III												Limites usuelles des paramètres dimensionnels de l'écoulement											
A – ECOULEMENTS A PREDOMINANCE LIQUIDE																							
	D	U _G	U _L	μ _L	μ _G	σ	ρ _G	ρ _L	a ^(vitesse son gaz)	g	θ (pente)												
min.	0.01 m	0.2 m/s	0.2 m/s	10 ⁻⁴ PI	≈ 10 ⁻⁵ PI	0.01 N/m	(0,03) 0.6	4000	100 m/s	10 m/s	≈ 0°/verticale												
max.	1.2 m	10 m/s	10 m/s	0.2 PI		0.2 N/m	400 kg/m ³	1000 kg/m ³	500 m/s		± 5°/horizontale												
B – ECOULEMENTS A PREDOMINANCE GAZ/VAPEUR																							
min.	0.01 m	10 m/s	10 ⁻⁴ m/s	10 ⁻⁴		0.01 N/m	0.03	400	100 m/s		≈ 0°/verticale												
max.	1.2 m	500 m/s	0.2 m/s	0.2		0.2 N/m	400 kg/m ³	1000 kg/m ³	500 m/s	10 m/s	± 5°/horizontale												
C – CONFIGURATIONS ET TRANSITIONS RETENUES (VERTICAL)																							
CONFIGURATIONS	<ul style="list-style-type: none"> Bulles Gouttes Film liquide (annulaire) Annulaire à gouttelettes Bouchons (avec ou sans bulles) et Poches 											TRANSITIONS	<ul style="list-style-type: none"> Bulles – Bouchons Bouchons – Film Bouchons – Annulaire à gouttelettes Film – Annulaire dispersé Annulaire dispersé – Gouttes 										
	<p>Les trois premières transitions entourant les régimes à bouchons sont d'un ordre de priorité plus élevé que les autres. A cette liste s'ajoutent les transitions internes (Bulles – Bulles, Bouchons – Bouchons, etc.) de morphologie des interfaces.</p>																						
D – CONFIGURATIONS ET TRANSITIONS RETENUES (SUB-HORIZONTAL)																							
CONFIGURATIONS	<ul style="list-style-type: none"> Stratifié (ondulé ou non, avec bulles ou non) Stratifié à gouttelettes (tendance vers l'annulaire) Bouchons et poches (avec bulles et gouttelettes éventuellement). 											TRANSITIONS	<ul style="list-style-type: none"> Stratifié – Stratifié à gouttelettes Stratifié (ondulé) – Bouchons et Poches 										
	<ul style="list-style-type: none"> Bulles Gouttes 												<p>pour mémoire, les études concernant ces régimes pourront être couplées aux études concernant les écoulements verticaux.</p>										
<p>Pour mémoire les transitions internes (Stratifié – Stratifié ondulé, Bouchons avec Bulles), et la transition Bulles – Bouchon non prioritaires.</p>																							

faces et de s'assurer de l'équilibre thermodynamique entre les phases.

5 – Métrologie

- a) on consultera le groupe "Séminaire Métrologie" de la S.H.F – Groupe Ecoulements Polyphasiques – en ce qui concerne les questions de sondes et d'interprétation des signaux,
- b) voir les tableaux I et II en ce qui concerne l'adaptation entre méthodes de mesure et configurations à étudier,

c) les transitions sont généralement progressives. Il conviendra donc dans ce cas d'en faire une analyse statistique.

Conclusions

L'étude des configurations rencontrées dans une vaste plage de régimes d'écoulement dans des conduites circulaires en écoulement isotherme pour des pentes

voisines de l'horizontal ou verticales présente un intérêt considérable. Le travail à faire est de grande ampleur eu égard

1 – au nombre élevé de paramètres indépendants

2 – à la nature statistique de la définition des transitions qui doit remplacer la définition "visuelle"

3 – à l'importance des dimensions nécessaires des installations compte tenu des effets d'établissement de régime.

Dans bien des cas, la notion de transition pourra varier selon les capteurs et les critères utilisés et il conviendra d'en faire une comparaison rigoureuse.

Les résultats d'une telle étude se présenteront sous la forme de cartes multidimensionnelles de configurations interprétées selon les grandeurs statistiques déduites de telle ou telle méthode. L'usage prévisionnel de ces cartes est immédiat dans beaucoup de cas

rencontrés au laboratoire ou dans des conditions industrielles.

De plus, les modèles d'écoulement devront pouvoir prédire les transitions ainsi mises en évidence : les résultats de l'étude des configurations pourra être un test sérieux des modèles d'écoulements élaborés dans d'autres cadres.

Références citées

- [1] BONNIN J. – Rapport POO 76-3, EDF
- [2] FITREMAN J.M., *thèse de doctorat* (1977), Université de Paris VI.
- [3] JONES O. et ZUBER N. – *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, 1975, pp. 273-306.