

# **Modélisation des pertes de charge dans des conduites pour des écoulements multiphasiques appliquée à des systèmes de production de pétrole**

Ir D. GAUDER  
Ir C. CHARLIER  
Ing. A. VITELLO  
GRAMME – Liège

*Le présent travail est consacré aux pertes de charge dans des conduites pour des écoulements multiphasiques utilisant le logiciel nommé VALI développé par la société BELSIM. L'objectif est de contribuer à l'amélioration de ce logiciel dans l'upstream du pétrole et du gaz. L'étude commence par la comparaison de différentes corrélations sur base de données provenant d'une plate-forme de production de pétrole. Finalement, l'étude s'est orientée vers la détermination de corrections de ces corrélations et cette méthode a ensuite été implémentée dans VALI et donne de bons résultats.*

*Mots-clefs : écoulement multiphasique – pertes de charge – pétrole – rapport gaz pétrole – modèle d'écoulement – masse volumique*

*The present work deals with pressure drops in pipes for multiphase flows using the software named VALI developed by the BELSIM company. The purpose is to contribute to the improvement of this software in the upstream of oil and gas. The study begins with the comparison between different correlations based on data coming from an oil production platform. Finally, the study was orientated towards establishing various corrections to these correlations and then this method was implemented in VALI and it gave accurate results.*

*Keywords : multiphase flow – pressure drops – oil – gas oil ratio – flow pattern – density*

## 1. Introduction

Ce travail a été réalisé au sein de l'entreprise BELSIM. Cette société est spécialisée dans l'ingénierie des procédés assistés par ordinateur. Elle est principalement active dans la production du pétrole et du gaz (upstream), le raffinage du pétrole et du gaz (downstream) et dans l'optimisation des procédés industriels.

BELSIM a développé un logiciel nommé VALI pour étudier les procédés industriels et celui-ci est spécialisé dans la réconciliation et la validation de données. Ce concept est basé sur une approche statistique. Il utilise des informations de redondance et des lois de conservation classiques pour valider des mesures d'un procédé et les convertir en informations précises et fiables. La figure suivante illustre l'utilité de la réconciliation et de la validation des données :

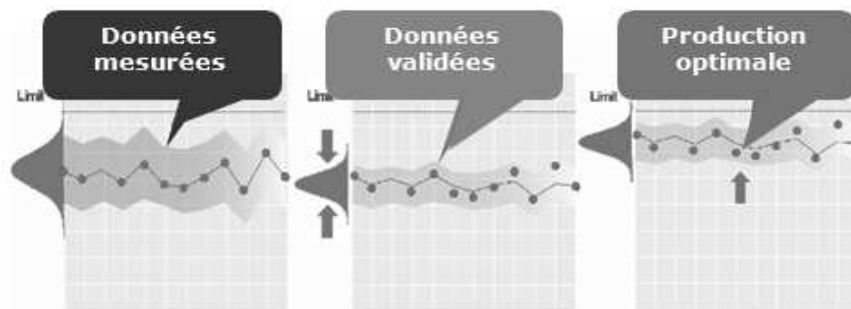


Figure 1 : Concept de validation et de réconciliation des données [3]

Comme tente de la montrer la figure 1, la réconciliation et la validation de données d'un procédé réduit les incertitudes autour des mesures (les zones en couleur grisée entourant les courbes) et identifie des points de fonctionnement plus précis du procédé permettant à celui-ci d'être réalisé à un rendement optimum.

Le projet effectué fait partie du secteur de l'upstream du pétrole et du gaz pour lequel un besoin a été ressenti par la société BELSIM afin d'améliorer le calcul des pertes de charge dans des conduites. Dans ce secteur, il est difficile de connaître les débits massiques des écoulements avec une bonne précision. Des capteurs existent pour mesurer ces débits, mais une redondance supplémentaire est nécessaire pour accroître le contrôle. Or,

dans un procédé, les pressions sont mesurées en général avec une bonne précision et peuvent être liées aux débits massiques des fluides par l'utilisation d'une corrélation de pertes de charge fiable. En comparant ainsi les valeurs de débits données par les corrélations et celles qui sont mesurées sur un procédé, cela contribue à améliorer le contrôle d'un procédé.

Les paragraphes suivants proposent quelques explications sur l'analyse qui a été établie sur des corrélations de pertes de charge existantes pour des écoulements pétroliers, mais également sur une plate forme de production de pétrole. Ensuite, des résultats graphiques sont mis en évidence montrant la comparaison entre des pertes de charge calculées et mesurées. Par après, des méthodes sont présentées sur l'amélioration des résultats donnés par ces corrélations. Enfin, quelques idées d'implémentation des corrélations dans le logiciel VALI sont mises en évidence.

## 2. Principaux concepts théoriques

Les concepts théoriques suivants doivent être introduits pour comprendre le comportement des écoulements multiphasiques. Ces concepts sont en effet très utilisés dans les corrélations des pertes de charge dans le domaine de l'upstream.

### 2.1 Equation générale des pertes de charge

Les pertes de charge totales d'un fluide sont dues aux variations de l'énergie potentielle et cinétique de ce fluide, mais également aux frottements sur les parois d'une conduite. Par conséquent, l'équation générale des pertes de charge est la suivante :

$$\left(\frac{dp}{dl}\right)_{tot} = \left(\frac{dp}{dl}\right)_{acc} + \left(\frac{dp}{dl}\right)_{grav} + \left(\frac{dp}{dl}\right)_{frott}$$

- Où
- $\left(\frac{dp}{dl}\right)_{acc}$  est le gradient de pression dû à l'accélération
  - $\left(\frac{dp}{dl}\right)_{grav}$  est le gradient de pression dû à la gravité
  - $\left(\frac{dp}{dl}\right)_{frott}$  est le gradient de pression dû aux frottements

Le premier terme de cette corrélation est souvent négligeable sauf si l'écoulement en question est un gaz. Pour les deux autres termes, leur importance varie en fonction de la disposition de la conduite (horizontale, oblique ou verticale).

## 2.2 Modèles d'écoulement

Les modèles d'écoulement sont un concept introduit pour les écoulements multiphasiques. Ceux-ci comprennent plusieurs phases et dans ce travail, l'écoulement multiphasique concerne le pétrole qui comprend essentiellement les phases comme l'huile, l'eau et le gaz.

Les modèles d'écoulement peuvent être rassemblés sur une carte telle que représentée sur la figure 2. Le modèle d'écoulement est une distribution géométrique de phases. Différentes configurations peuvent se produire dans une conduite dépendant de son orientation et des valeurs des paramètres des écoulements liquides et de gaz. Sur la figure 2, les paramètres des fluides utilisés sont des paramètres adimensionnels :  $N_{gv}$  (proportionnel à la vitesse du gaz) et  $N_{lv}$  (proportionnel à la vitesse du liquide).

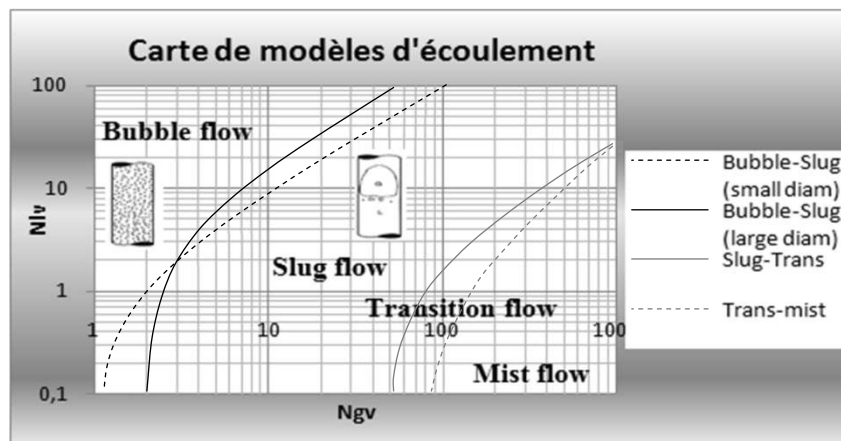


Figure 2 : Carte de modèles d'écoulement [10]

Deux modèles d'écoulements sont largement rencontrés dans les milieux pétroliers à savoir ceux nommés "bubble flow" et "slug flow". Le "bubble flow" est un modèle rencontré lorsque l'écoulement gazeux prend la forme de bulles de gaz distribuées uniformément dans un liquide. Le "slug flow"

est un régime quant à lui caractérisé par des couches de liquides séparées par de larges poches de gaz.

### **2.3 Glissement**

Le glissement est un important concept pour les écoulements multiphasiques et apparaît quand un liquide et un gaz s'écoulent ensemble dans des conduites verticales ou inclinées. Le glissement est caractérisé par une différence de vitesse entre deux phases d'un écoulement. Généralement, dans une conduite verticale, la vitesse de la phase gazeuse est supérieure à la vitesse de la phase liquide. Une corrélation qui prend en compte cette notion donne des valeurs de pertes de charge plus élevées que celles qui n'en tiennent pas compte.

### **2.4 Rapport gaz pétrole (GOR)**

Le rapport gaz pétrole noté GOR est égal au rapport du volume total de gaz sur le volume total de pétrole dans un mélange, tous les deux pris dans des conditions standards de température et pression. Le GOR reste dès lors constant pour un fluide s'écoulant le long d'une conduite. Cette propriété du pétrole est très importante dans la suite de ce travail.

### **2.5 Introduction de différentes corrélations**

Différentes corrélations de pertes de charge développées par divers auteurs ont été étudiées. Dans un premier temps, une note de développement de ces différentes corrélations a été établie et celles-ci ont ensuite été implémentées dans Excel.

Chaque corrélation a un domaine d'application particulier : elles sont soit applicables dans une conduite horizontale ou verticale, soit parfois dans les deux cas. Certaines prennent en compte les modèles d'écoulement et/ou le glissement. Un tableau récapitulatif pour toutes les corrélations étudiées dans ce travail est dressé ci-après :

| Correlations          | Modèles d'écoulements | Glissement | Orientation de la conduite |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|
| Monophase             |                       |            | -                          |
| Lockhart & Martinelli |                       |            | Horizontal                 |
| Dukler                |                       |            | Horizontal                 |
| Beggs & Brill         | x                     | x          | Indifférent                |
| Hagedorn & Brown      |                       | x          | Vertical                   |
| Griffith              |                       | x          | Vertical                   |
| Duns & Ros            | x                     | x          | Vertical                   |
| Orkiszewski           | x                     | x          | Vertical                   |

*Tableau 1 : Tableau comparatif des différentes corrélations  
[2] - [4] - [7] - [8] - [9]*

Une analyse de ces différentes corrélations a donc été réalisée. Le comportement de chaque corrélation a été étudié par rapport à divers paramètres tels que les débits massiques et la densité de la phase liquide, le but étant de voir l'influence de ces divers paramètres sur les corrélations.

### **3. Comparaison des différentes corrélations**

Dans le but de comparer les valeurs de pertes de charge données par les différentes corrélations avec celles mesurées, une partie d'une plate-forme de production de pétrole située en Angola a été étudiée. Plusieurs mesures telles que les débits, les densités sont réalisées dans cette installation et ceci rend la comparaison possible.

### 3.1 Schéma de l'installation globale

La partie de l'installation étudiée est représentée sur la figure suivante :

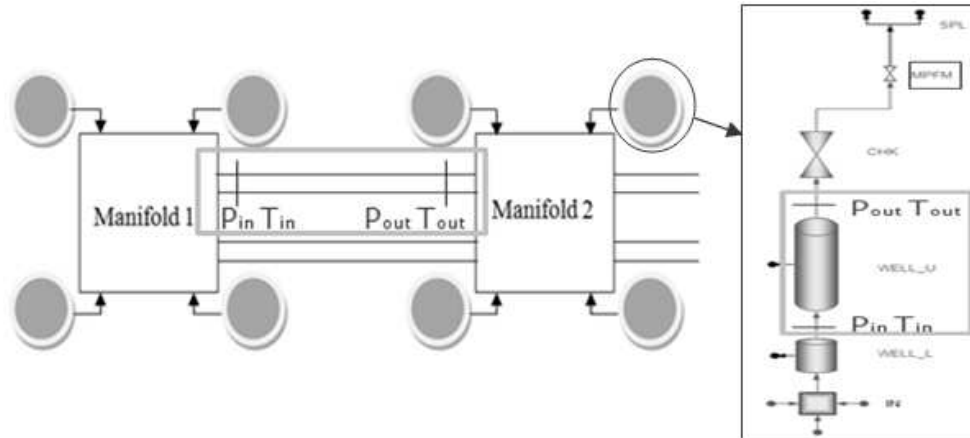


Figure 3 : Schéma d'une partie plate-forme de production de pétrole

Les cercles représentent des puits desquels le pétrole est extrait et est mené à un collecteur (manifold en anglais) illustré par un carré. Les pertes de charge ont été étudiées et mesurées dans les conduites horizontales se trouvant entre les deux collecteurs.

L'entreprise BELSIM a développé un logiciel VALI avec lequel il est possible de modéliser des unités d'un procédé telles que des conduites, des vannes, des séparateurs, etc. Dans l'installation précédente, les puits qui sont représentés par des cercles ont été modélisés et le flow-sheet de ceux-ci se trouve sur la droite (fig. 3).

### 3.2 Résultats pour les conduites horizontales

Les pertes de charge données par les corrélations ont été comparées à celles mesurées sur l'installation (différence de pression entre les deux collecteurs) et le graphique suivant a été obtenu :

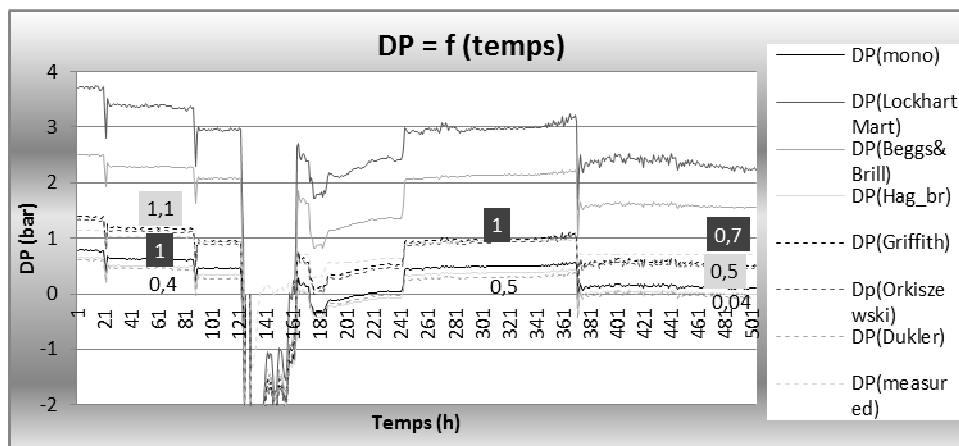


Figure 4 : Résultats pour des conduites horizontales

Sur la figure 4, les pertes de charge mesurées sont en traits discontinus ("DP measured" dans la légende) et il peut être observé que les valeurs de pertes de charge données par la corrélation d'Orkiszewski sont proches de celles mesurées (elles sont quasi confondues et on perçoit à peine les différences). La corrélation monophasique quant à elle donne des valeurs sous estimées car elle ne prend pas en compte le facteur de glissement (tab. 1).

### 3.3 Résultats pour les conduites verticales

Dans le cas des conduites verticales, plusieurs graphiques étudiés pour différents puits donnaient parfois de grandes différences entre les valeurs calculées et mesurées. Ci-dessous sont représentés les nombreux résultats pour une conduite verticale :



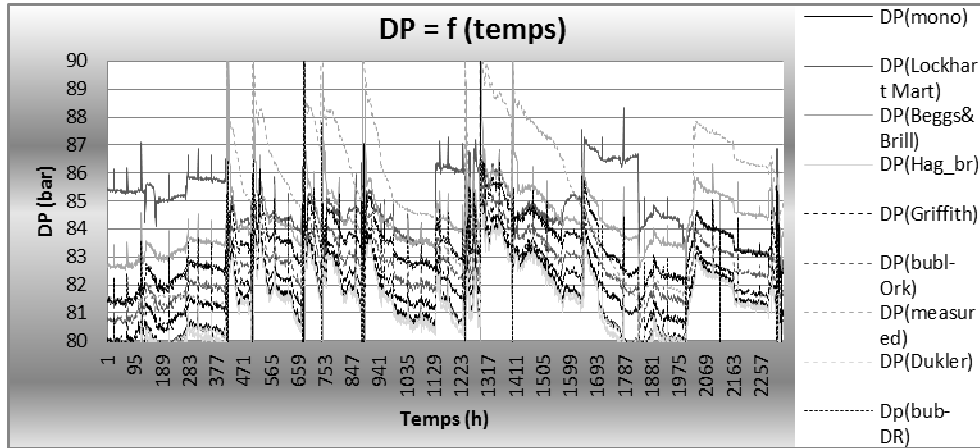


Figure 5 : Résultats pour des conduites verticales

On note que dans certains cas, les résultats donnés par les corrélations sont proches et parfois fort éloignés de ceux mesurés. Une étude de l'influence de différents paramètres tels que les débits massiques, le GOR et la teneur en eau dans le pétrole a été réalisée. L'utilisation d'un outil statistique appelé la covariance a permis de mettre en évidence que le GOR (§ 2.4) avait une grande influence sur cette différence.

La figure ci-après permet de voir la variation du GOR au cours du temps et si l'on établit une comparaison avec la figure 5 (les mêmes périodes de temps sont prises en compte), on peut voir que l'hypothèse avancée auparavant est vérifiée. Lorsque le GOR est petit, l'écart entre les pertes de charge calculées et mesurées est grand tandis que lorsque le GOR est grand, l'écart est petit.

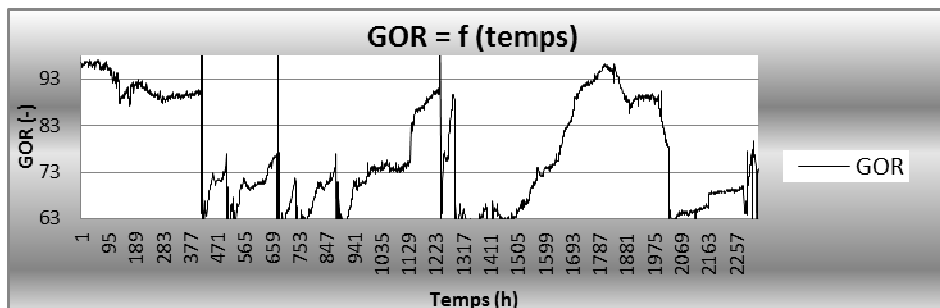


Figure 6 : Variation du GOR au cours du temps

## 4. Amélioration du calcul des pertes de charge

Dans cette section sont présentés différents moyens qui ont été mis en œuvre pour améliorer le calcul des pertes de charge dans des conduites.

### 4.1 Correction de la masse volumique

La correction de la masse volumique intervenant dans le calcul des pertes de charge a été envisagée dans le but de réduire l'erreur réalisée lorsque le GOR variait.

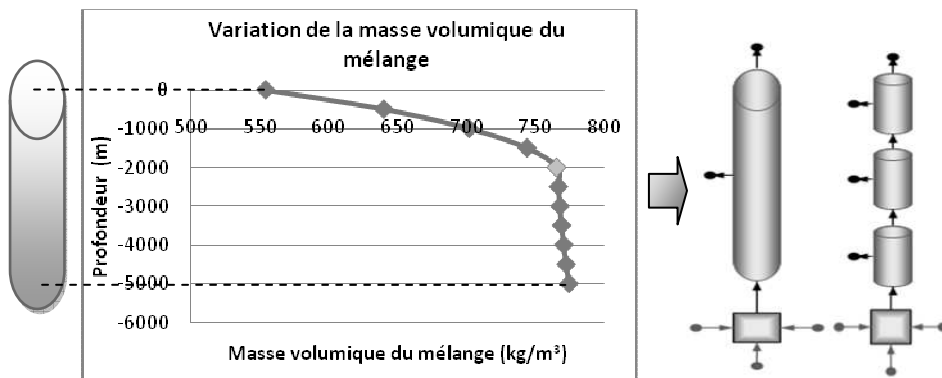


Figure 7 : Variation de la masse volumique le long d'une conduite

On peut remarquer sur la figure 7 que la masse volumique ne varie pas linéairement le long d'une conduite. Néanmoins, le logiciel VALI ne prenait pas en compte cette variation et les valeurs de masses volumiques introduites dans les corrélations étaient la moyenne des densités en entrée et sortie de la conduite. Afin de remédier à ce problème, l'idée fut d'implémenter dans le logiciel VALI une fonction simulant la découpe de la conduite en plusieurs morceaux pour lesquels les pertes de charge sont calculées indépendamment les unes des autres.

Si l'on calcule l'erreur relative réalisée sur l'estimation des pertes de pression et que l'on regarde l'impact du GOR sur cette erreur, le graphique suivant est obtenu :

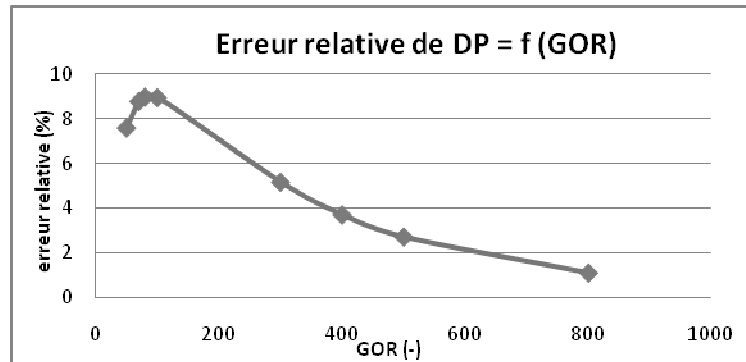


Figure 8 : Variation de l'erreur relative en fonction du GOR

Une correction de la densité permet dès lors d'obtenir de meilleurs résultats tels que représentés sur la figure 9. Les courbes sont en effet plus rapprochées sur la figure de droite.

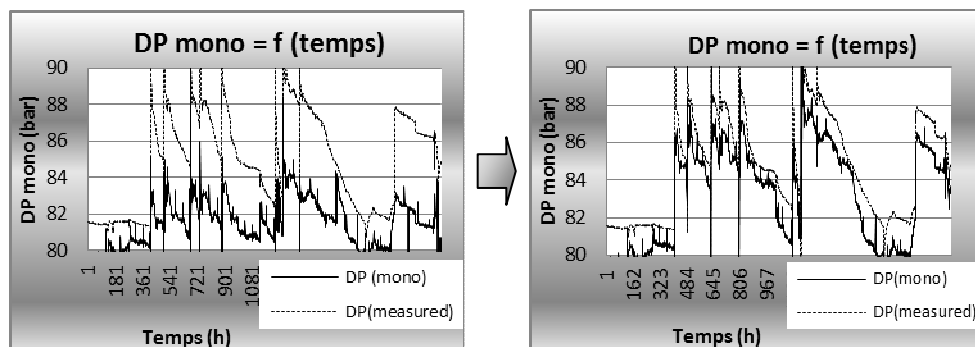


Figure 9 : Amélioration de la précision par la correction de la masse volumique

#### 4.2 Introduction d'un facteur correctif

Dans le but de rapprocher les valeurs de pertes de charge calculées à celles mesurées, divers facteurs correctifs ont été étudiés tels que des biais (BDP), des facteurs multiplicatifs (FMDP), ainsi que l'application simultanée des deux facteurs. Après une étude comparative, il s'est avéré que l'application d'un facteur multiplicatif était le plus approprié. Il se calcule de la manière suivante :

$$FMDP = \frac{\text{moyenne DP (mesuré)}}{\text{moyenne DP (calculé)}}$$

Les moyennes sont calculées sur une période de temps représentative. Ensuite, ce FMDP est introduit dans la corrélation des pertes de charges :

$$DP_{corr-FMDP} = DP_{corr} * FMDP$$

Après l'application de ce facteur, les résultats donnés par les calculs étaient plus précis tels qu'illustrés sur la figure suivante :

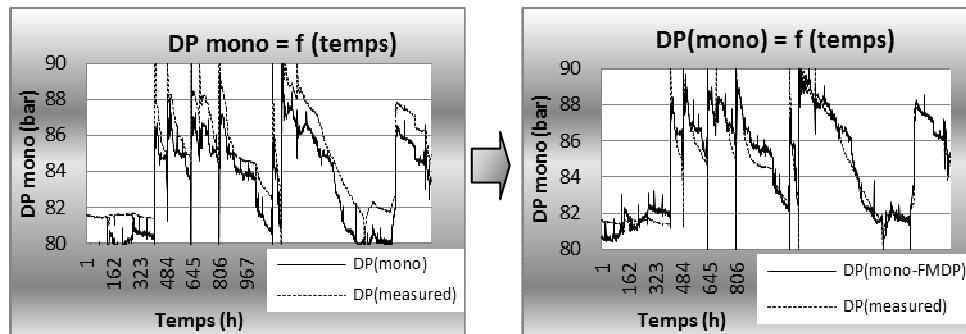


Figure 10 : Amélioration de la précision par l'introduction d'un facteur correctif

### 4.3 Comparaison entre les différentes corrélations

Après avoir apporté quelques corrections aux calculs des pertes de charge, une comparaison entre les résultats donnés par les différentes corrélations a été établie sur base d'une analyse graphique (fig. 11).

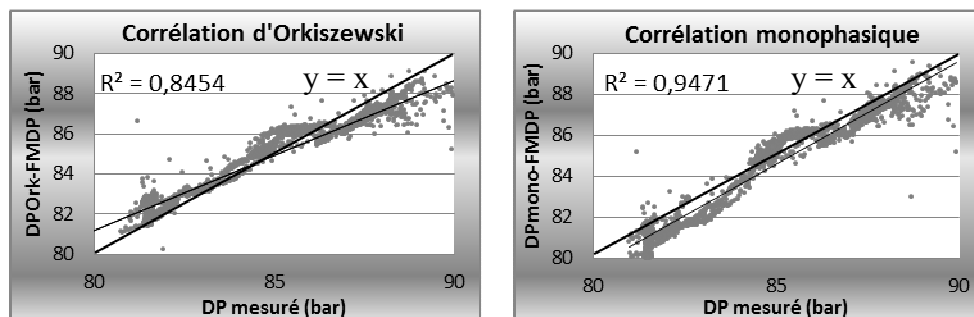


Figure 11 : Analyse graphique des corrélations

Les graphiques précédents ont été établis pour différentes corrélations. Les résultats obtenus sont précis lorsque tous les points suivent les droites d'équation  $y=x$ .

Une analyse statistique a été établie et les paramètres statistiques utilisés ont été le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces deux paramètres ont été calculés à l'aide d'Excel. Divers tableaux, dont un modèle est donné ci-dessous, ont été complétés pour plusieurs conduites.

| <b>Corrélations</b>              | <b>Val de FMDP</b> | <b><math>R^2</math></b> | <b>RMSE</b> |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------|
| <b>Monophase</b>                 | 1.039              | 0.836                   | 0.74        |
| <b>Lockhart &amp; Martinelli</b> | 1.019              | 0.584                   | 1.06        |
| <b>Beggs &amp; Brill</b>         | 1.021              | 0.378                   | 1.48        |
| <b>Hagedorn &amp; Brown</b>      | 1.041              | 0.839                   | 0.75        |
| <b>Griffith</b>                  | 1.011              | 0.825                   | 0.71        |
| <b>Orkiszewski</b>               | 1.011              | 0.825                   | 0.71        |
| <b>Duns &amp; Ros</b>            | 1.028              | 0.810                   | 0.75        |
| <b>Dukler</b>                    | 1.043              | 0.838                   | 0.73        |

*Tableau 2 : Tableau de valeurs*

Les résultats sont précis lorsque le coefficient de détermination est proche de 1 et l'erreur quadratique proche de 0. Il s'est avéré après plusieurs comparaisons que la corrélation d'Orkiszewski propose de nouveau les meilleurs résultats.

#### **4.4 Amélioration du calcul de la viscosité**

Sur le tableau 2, on peut noter que les valeurs du coefficient de détermination sont encore assez élevées. Dans le but d'améliorer les résultats donnés par les corrélations, une amélioration du calcul de la viscosité intervenant dans celles-ci a été envisagée.

Dans VALI, différentes corrélations pour calculer la viscosité existaient tels que celles de Pedersen et Vanvelzen, mais aucune ne donnait de bons résultats. L'idée a été de modifier une corrélation existante pour qu'elle donne de meilleurs résultats. La corrélation qui a été améliorée est celle de Vanvelzen qui dépend de la température, de la composition du fluide et de

deux paramètres ajustables VISL1 et VISL2 selon la relation  $\log \text{viscosité} = \text{VISL1} * (1/T - 1/\text{VISL2})$ . Le but était de modifier la valeur de ces deux paramètres de telle sorte que les valeurs de viscosité expérimentales soient proches de celles calculées.

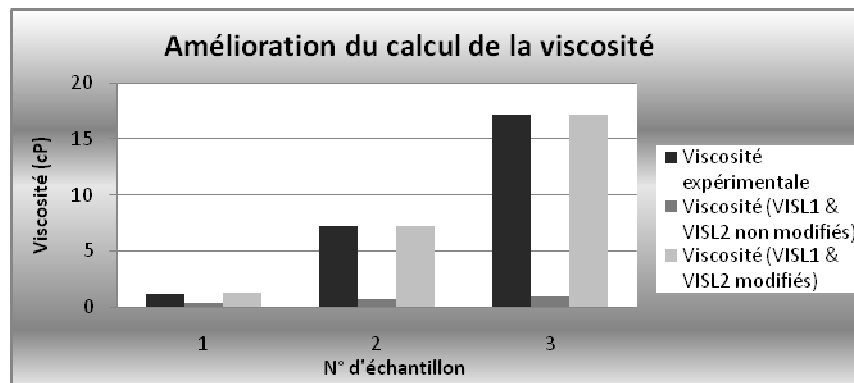


Figure 12 : Amélioration du calcul de la viscosité

Sur la figure 12, on peut dès à présent remarquer que la corrélation de Vanvelzen donne des valeurs de viscosité proches de celles expérimentales pour les trois échantillons.

#### 4.5 La transition entre deux modèles d'écoulement

La principale préoccupation avec les modèles d'écoulement (illustrés par la figure de gauche en fonction du nombre de Froude  $N_{Fr}$  et du facteur de glissement  $lda L$ ) est le cas pour lequel un fluide qui s'écoule à travers une conduite est à la frontière de deux modèles d'écoulement (fig. 13). Cette transition n'est pas progressive et mène la plupart du temps à une discontinuité dans le calcul des pertes de charge telle qu'illustrée sur la figure suivante.

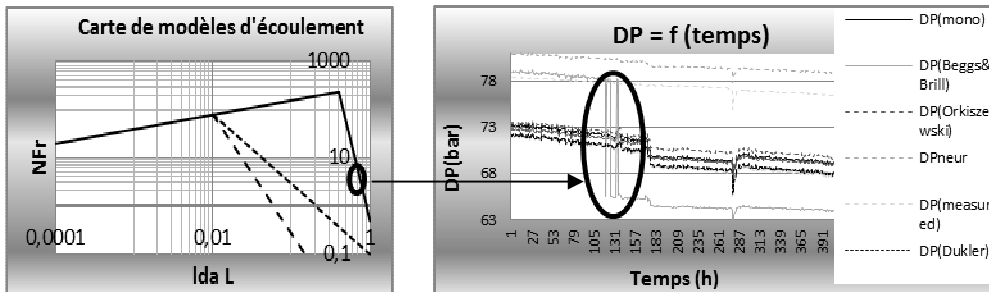


Figure 13 : Transition entre deux modèles d'écoulement [5]

De telles discontinuités doivent être évitées dans l'implémentation des corrélations dans VALI car ce logiciel est basé sur un solveur linéaire numérique et aucune solution n'est trouvée par le logiciel si une discontinuité est présente. Comme la corrélation d'Orkiszewski donne des résultats précis et qu'elle a été choisie pour être implémentée dans VALI, le problème des discontinuités a dû être résolu.

Sans trop entrer dans les détails, précisons qu'une solution pour pallier ce problème a été trouvée et consiste en l'introduction d'une fonction sigmoïde à la transition de deux modèles d'écoulement. Cette fonction est déterminée à l'aide de certaines conditions aux limites.

## 5. Conclusion

Un des buts principaux de ce travail était de trouver une nouvelle méthode de calcul de pertes de charge dans des conduites pour des écoulements multiphasiques et plus précisément pour le pétrole comportant principalement trois phases à savoir l'huile, l'eau et le gaz. Cette méthode devait ensuite être implémentée dans le logiciel VALI et être flexible à divers projets. Celle-ci devait aussi pallier un manque d'efficacité des méthodes proposées.

Sur base d'une comparaison établie entre les valeurs calculées et mesurées, il a pu être établi qu'une grosse erreur de calcul était réalisée dans le cas des conduites verticales. Cette erreur a été remédiée par une correction de la masse volumique le long d'une conduite.

Le choix d'une corrélation a ensuite été étudié en utilisant des outils statistiques et après diverses comparaisons, il a pu être démontré que la corrélation d'Orkiszewski donnait les meilleurs résultats. D'autres améliorations ont été cependant apportées telles que l'introduction d'un facteur correctif, l'amélioration du calcul de la viscosité et une résolution au problème de la discontinuité entre des modèles d'écoulement.

La nouvelle méthode a dès lors été implémentée dans le logiciel VALI au moyen d'un code Flex (spécifique au programme VALI) et il peut être conclu que celle-ci donne de bons résultats. Elle a déjà été utilisée dans un projet pour lequel il a été nécessaire de calculer le rendement d'une pompe. Pour calculer celui-ci, il était nécessaire de connaître les débits d'un fluide à la base d'une conduite verticale. Connaissant les pressions aux deux extrémités de la conduite et par l'utilisation de la nouvelle méthode de calcul des pertes de charges, il fut aisé d'en déduire la valeur des débits. Les résultats ont été concluants.

## 6. Sources

[1] ARNOLD K. & MAURICE S., *Surface Production Operations*  
Texas, Gulf Publishing Company, 1987.

[2] ASSANTE B., *Accounting for the presence of liquids in gas pipelines*  
Houston, Enron Transportation Services, 2003.

[3] BELSIM page consultée le 30 avril 2010,  
<http://www.belsim.com>.

[4] BOYUN G., WILLIAM C., & al., *Petroleum Production Engineering*  
Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 2007.

[5] BRENNEN C., *Fundamentals of multiphase flow*  
Cambridge, Cambridge University Press, 2005.

[6] CHARLIER C., *Introduction au génie chimique*  
Liège, Publi-Etudiant, 2007.



- [7] CHARLIER C., *La chimie industrielle organique*  
Liège, Publi-Etudiant, 2008.
- [8] CHOLET H., *Well Production Practical Handbook*  
Paris, Technip, 2008.
- [9] DELHAYE J.M., GIOT M. & RIETHMULLER, M.L., *Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering*  
London, Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
- [10] GABOR Takacs, *Gas Lift Manual*  
Tulsa (Oklahoma), PennWell Corporation, 2005.
- [11] *Handbook of chemistry and physics*  
68<sup>th</sup> edition, Boca Raton, CRC press, 1987-1988.
- [12] SZILAS A.P., *Production and transport of oil and gas*  
Amsterdam, Elsevier Scientific publishing company, 1975.
- [13] WAUQUIER J., *Petroleum Products*  
1st édition, Paris, Technip, 1995.