

# Comportement des coulis de glace en conduite horizontale

Le chapitre précédent nous a permis de comprendre de manière générale le comportement d'un coulis en cours de cristallisation, et d'expliciter une méthode de détermination de la teneur en particules solides en tout point de la conduite.

Ce chapitre cherche à décrire le comportement rhéologique des coulis en fonction de la fraction volumique en particules solides.

## 1. Choix d'un modèle de comportement rhéologique

Le protocole expérimental décrit au chapitre 2.4, permet d'obtenir pour différentes teneurs en solides, des mesures de pertes de charge en fonction du débit volumique imposé. Nous explicitons ici la démarche adoptée afin de déduire de ces mesures le comportement rhéologique des coulis.

### 1.1. Données expérimentales « brutes »

La Figure 3.2-1 présente l'évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse moyenne du fluide dans la conduite lors de l'écoulement d'un coulis de Hycool-25. Les pertes de charge mesurées sur la conduite de 3/4 pouce de diamètre sont représentées avec des carrés. Les triangles représentent les résultats obtenus avec la conduite de 1/2 pouce. Dans la mesure où les conduites sont installées en série sur notre dispositif expérimental, la conservation du débit impose que les vitesses moyennes de passage dans la conduite de plus petit diamètre sont plus importantes que dans la plus grande. La légende fournit les valeurs des fractions volumiques en glace correspondantes.

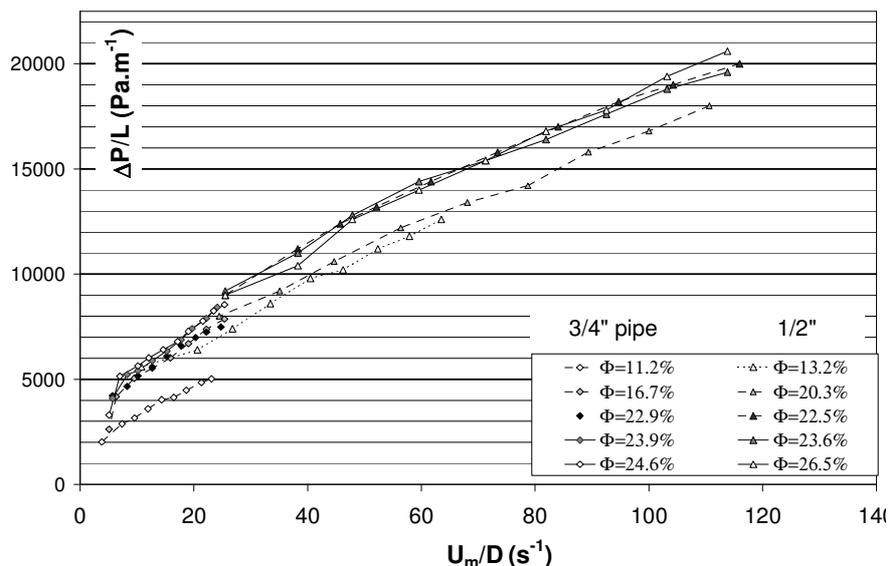


Figure 3.2-1 : Evolution de la perte de charge en fonction de la vitesse débitante pour des coulis de glace de Hycool-25, pour différentes fractions volumiques en glace et dans deux conduites de diamètres différents (3/4'' et 1/2'').

Une première observation est alors que ces courbes ne passent pas par l'origine si l'on cherche à les extrapoler jusqu'à  $U_m = 0$  de manière monotone, c'est-à-dire en conservant la même pente.

Or, pour un fluide newtonien en écoulement laminaire, la perte de charge en conduite horizontale varie linéairement avec la vitesse débitante de la manière exprimée par l'Eq. 3.2-1.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\mu\bar{U}}{D} \quad \text{Eq. 3.2-1}$$

Une première observation est alors que ces courbes ne passent pas par l'origine si l'on cherche à les extrapoler jusqu'à  $U_m = 0$  de manière monotone, c'est-à-dire en conservant la même pente. Il est alors clair que le comportement de ces coulis n'est pas newtonien. Il nous faut donc chercher un modèle de comportement rhéologique adapté à ces résultats expérimentaux.

### 1.2. Indice d'écoulement

Le choix d'un modèle de comportement rhéologique doit être réalisé de manière à décrire le comportement d'un fluide de manière la plus réaliste possible. Il s'avère que celui n'est pas unique. La Figure 3.2-2 met en évidence la difficulté du choix d'un modèle de comportement lorsque les points expérimentaux ne couvrent qu'une gamme réduite de vitesses de cisaillement. En effet, les modèles de fluide de Bingham et d'Ostwald de Waele par exemple, peuvent se superposer dans un certain domaine de vitesses de cisaillement, et en particulier lorsque l'on s'éloigne du domaine de très faibles vitesses de cisaillement. Nous cherchons donc à déterminer un modèle qui décrit au mieux le comportement observé dans les conditions accessibles expérimentalement.

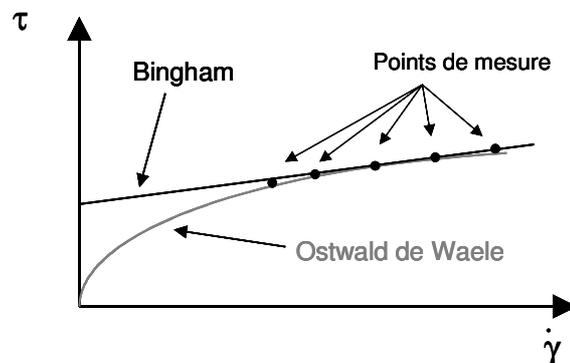


Figure 3.2-2 : Choix d'un modèle rhéologique à partir des données expérimentales

Dans un premier temps, nous cherchons à déterminer quel est l'indice d'écoulement de nos fluides. Pour ce faire, nous employons la méthode décrite dans le chapitre 2.5. La Figure 3.2-3 représente l'évolution des logarithmes de  $D\Delta P/(4L)$  et de  $8\bar{U}/D$ .

Les pentes de ces courbes fournissent alors la valeur de l'indice de l'écoulement.

Ainsi, pour toutes les concentrations en cristaux de glace étudiées, les indices d'écoulement des coulis sont compris entre 0,45 et 0,50. Les indices d'écoulement obtenus à partir des mesures effectuées sur la conduite de diamètre  $\frac{3}{4}$  pouce sont légèrement supérieurs à ceux obtenus avec la conduite de diamètre  $\frac{1}{2}$  pouce.

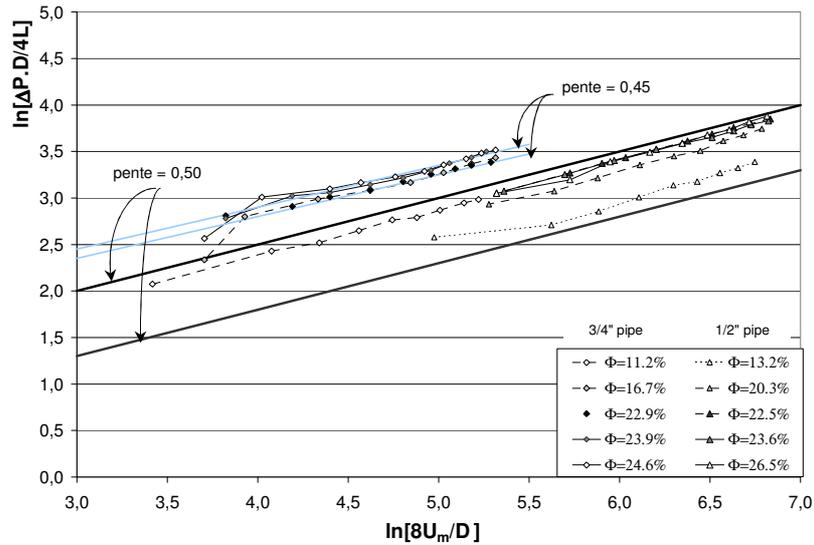


Figure 3.2-3 : Détermination graphique de l'indice de l'écoulement.

Il semblerait alors que les coulis de glace soient alors plutôt des fluides rhéofluidifiants, qui voient donc leur viscosité apparente diminuer lorsque l'intensité du cisaillement augmente. Ce comportement rhéofluidifiant est légèrement plus important dans la conduite de plus gros diamètre, c'est à dire pour des vitesses de cisaillement plus faibles.

### 1.3. Vitesse et contrainte de cisaillement

Nous l'avons, vu dans le chapitre 2.5, le bilan de quantité de mouvement permet d'exprimer la contrainte de cisaillement à la paroi d'une conduite cylindrique, quel que soit le comportement rhéologique du fluide sous la forme de l'Eq. 3.2-2 .

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L} \quad \text{Eq. 3.2-2}$$

L'expression de la vitesse de cisaillement à la paroi dépend quant à elle du comportement rhéologique du fluide. Dans le cas d'un fluide dont le comportement obéit à une loi puissance, ou une loi d'Herschel-Buckley, dont l'indice d'écoulement est différent de 1, elle s'exprime sous la forme de l'Eq. 3.2-3. (voir Chapitre 2.5)

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8\bar{U}}{D} \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \quad \text{Eq. 3.2-3}$$

Où  $n$  est l'indice de l'écoulement déterminé précédemment :

$$n = \frac{d \ln\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)}{d \ln\left(\frac{8\bar{U}}{D}\right)} = \frac{d \ln(\tau_w)}{d \ln\left(\frac{8\bar{U}}{D}\right)} \quad \text{Eq. 3.2-4}$$

### 1.4. Contrainte seuil

Afin de compléter la description du comportement rhéologique du fluide, on peut s'interroger sur la nécessité d'introduire ou pas une contrainte seuil de cisaillement. Pour ce faire, on propose de représenter la contrainte de cisaillement à la paroi en fonction de  $(\dot{\gamma}_w)^n$ . La Figure 3.2-4 présente les courbes obtenues. On obtient des courbes qui peuvent être représentées par des droites qui passent par l'origine. Ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire d'introduire une contrainte de cisaillement seuil pour décrire le comportement rhéologique des coulis de glace étudiés.

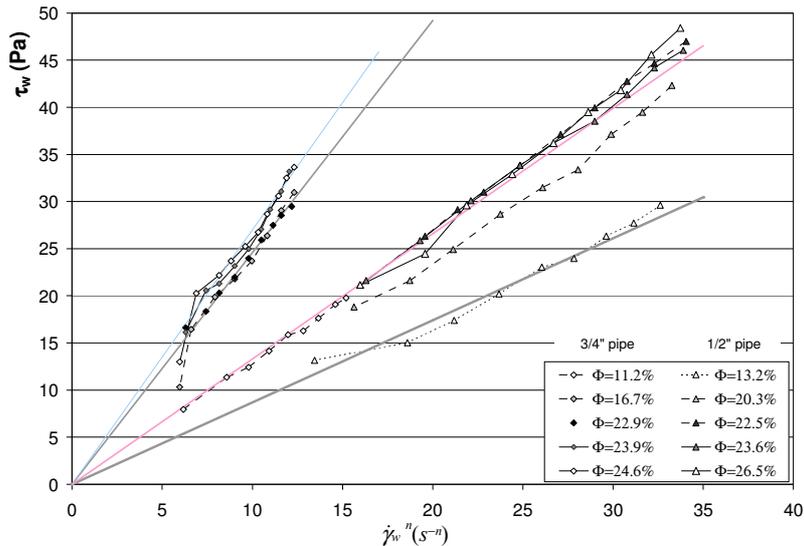


Figure 3.2-4 : Détermination graphique de la consistance  $k$  du fluide

### 1.5. Conclusion

Nous proposons alors d'adopter un modèle à deux paramètres de type «Ostwald de Waele » dont la loi rhéologique est donnée par l'Eq. 3.2-5 :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad \text{Eq. 3.2-5}$$

Avec  $n$  l'indice d'écoulement et  $k$ , la consistance du fluide.

Alors que la consistance est un paramètre intrinsèque au fluide étudié, la viscosité apparente est, quant à elle, dépendante de la vitesse de cisaillement appliquée au coulis. En reportant sa définition générale (Eq. 3.2-6) dans l'Eq. 3.2-5, on obtient son expression (Eq. 3.2-7).

$$\tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad \text{Eq. 3.2-6}$$

$$\mu(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{Eq. 3.2-7}$$

## 2. Rhéogrammes des coulis de glace de HYCOOL-25

Nous avons choisi d'utiliser un modèle de type « Ostwald de Waele » pour décrire le comportement rhéologique des coulis de glace étudiés. Nous sommes alors en mesure d'exprimer les vitesse et contrainte de cisaillement de ces fluides (Eq. 3.2-2 et Eq. 3.2-3) et de tracer leurs rhéogrammes (Figure 3.2-5).

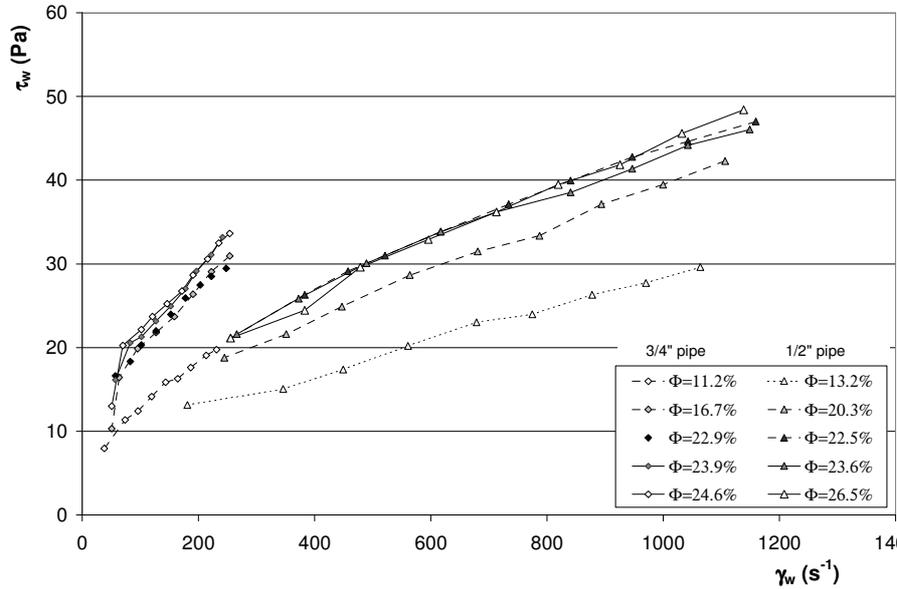


Figure 3.2-5 : Rhéogrammes des coulis de glace

Dans le cas d'un fluide de comportement de type « loi puissance », la relation de Rabinovitch permet d'exprimer la contrainte de cisaillement à la paroi en fonction de la vitesse débitante (Eq. 3.2-8) puis de la vitesse de cisaillement à la paroi (Eq. 3.2-9).

$$\tau_w = k \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n \left( \frac{8\bar{U}}{D} \right)^n \quad \text{Eq. 3.2-8}$$

$$\tau_w = k \dot{\gamma}_w^n \quad \text{Eq. 3.2-9}$$

Les valeurs obtenues pour les paramètres rhéologiques (consistance et indice d'écoulement) sont récapitulées dans le Tableau 3.2-1.

Conduite ½ pouce					
Φ	13,2%	20,3%	22,5%	23,6%	26,5%
$k (\pm 0,02)$	0,87	1,20	1,36	1,33	1,36
$n (\pm 0,01)$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Conduite ¾ pouce					
Φ	11,2%	16,7%	22,9%	23,9%	24,6%
$k (\pm 0,02)$	1,33	2,10	2,46	2,70	2,70
$n (\pm 0,01)$	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45

Tableau 3.2-1 : Valeurs des paramètres rhéologiques des coulis de glace de HYCOOL-25

La Figure 3.2-6 présente alors l'évolution de la viscosité apparente calculée à partir des valeurs de la consistance en fonction de la vitesse de cisaillement, pour différentes fractions volumiques en glace. La figure de gauche concerne la conduite  $\frac{1}{2}$  pouce, et celle de droite la conduite  $\frac{3}{4}$  pouce.

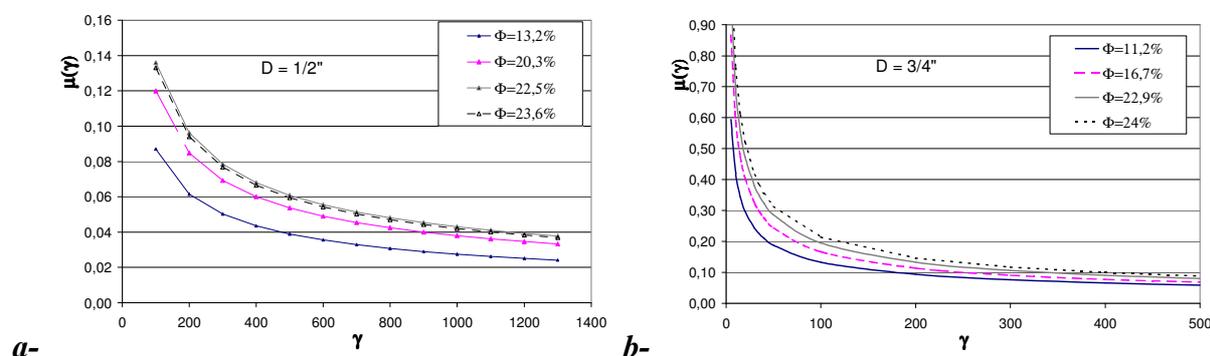


Figure 3.2-6 : Evolution de la viscosité apparente avec la vitesse de cisaillement a- Conduite  $\frac{1}{2}$  " ; b- Conduite  $\frac{3}{4}$  "

### 3. Discussion

Cette étude nous permet de décrire le comportement des coulis de glace de HYCOOL-25 à partir de lois puissance de type Ostwald de Waele. L'indice de l'écoulement et la consistance du fluide, dépendent non seulement de la fraction volumique en particules solides mais aussi du diamètre de la conduite. Ce comportement rhéofluidifiant a souvent été observé pour les coulis de glace. Nous pouvons, à titre d'exemple, faire référence aux travaux de ben Lakhdar (1998) dont quelques résultats ont été présentés dans le Chapitre 1.6. Une comparaison plus poussée de nos résultats avec ceux de la littérature est menée dans le Chapitre 3.5.

Ainsi, il n'est pas possible de raccorder les mesures réalisées sur les conduites de  $\frac{1}{2}$  pouce et  $\frac{3}{4}$  pouce. La nature de l'écoulement est alors dépendante du diamètre de la conduite. Cette différence peut s'interpréter par l'existence d'une fine couche de fluide ne contenant aucune particule au voisinage de la paroi, ou bien par des phénomènes de stratification. En effet, comme nous l'avons déjà évoqué, les vitesses de cisaillement sont moins importantes dans la conduite de plus grand diamètre pour un même débit. Les vitesses de cisaillement à la paroi sont toujours inférieures à  $300 \text{ s}^{-1}$ . Dans ces conditions, les effets d'inertie sont très faibles.

De plus, si l'on place du coulis de glace dans un bécier, au repos, on observe une stratification très rapide des cristaux qui se rassemblent pour former une couche à la surface supérieure.

Enfin, un phénomène de stratification a par ailleurs déjà été mis en évidence dans le générateur de coulis, à l'aide de mesures d'indice de réfraction (Chapitre 3.1). Le fluide prélevé dans la partie supérieure du générateur est en effet plus riche en glace que la moyenne.

## Comportement rhéologique des coulis d'hydrates de TBAB en conduite horizontale

Le chapitre précédent a présenté une méthode d'étude du comportement rhéologique des coulis de glace. Ce chapitre vise, quant à lui, à décrire le comportement des coulis d'hydrates de TBAB.

La démarche adoptée est la même que lors de l'étude des coulis de glace ; elle s'appuie encore une fois sur le Chapitre 2.5.

### 1. Choix d'un modèle de comportement rhéologique

#### 1.1. Données expérimentales « brutes »

Les essais expérimentaux, réalisés selon le protocole décrit au Chapitre 2.4, permettent d'obtenir, pour différentes teneurs en solide, des mesures de pertes de charge en fonction du débit volumique imposé.

Les Figure 3.3-1a et b représentent l'évolution de la perte de charge linéaire, mesurée respectivement sur une conduite de 3/4" et 1/2", en fonction de la vitesse moyenne du fluide. Les valeurs des fractions volumiques en particules sont données par la légende de chaque courbe. Ces mesures ont été réalisées avec une solution de TBAB de concentration initiale massique de 35%. Des courbes de même type, obtenues pour différentes concentrations initiales en TBAB, sont présentées dans l'Annexe 2.

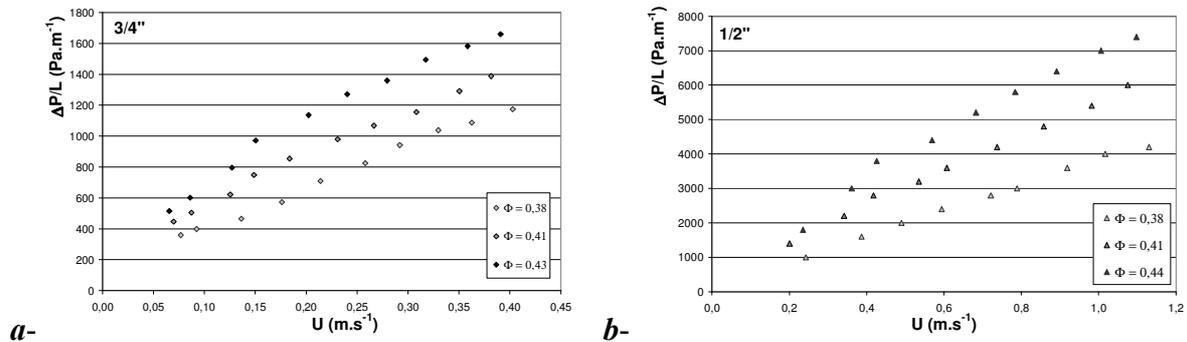


Figure 3.3-1 : Evolution de la perte de charge en fonction de la vitesse débitante pour un coulis d'hydrate de type A ( $x_0=0,35$ )

Les courbes obtenues peuvent être approchées par des droites qui, dans la plupart des cas, ne passent pas par l'origine du repère. Comme l'illustre la Figure 3.3-2, les mesures effectuées pourraient correspondre à un comportement de type Bingham ou d'Ostwald de Waele si les vitesses de cisaillement considérées sont supérieures à la vitesse de cisaillement pour laquelle le comportement du fluide d'Ostwald de Waele s'approche d'un comportement linéaire.

L'existence réelle d'une contrainte seuil ne peut être mise en évidence expérimentalement. En effet, nous ne sommes capables de faire des mesures que pour des vitesses moyennes d'écoulement non nulles.

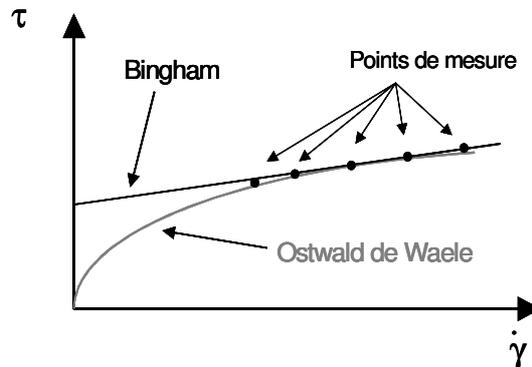


Figure 3.3-2 : Choix d'un modèle rhéologique à partir des résultats expérimentaux

Nous choisissons dans un premier temps de décrire nos coulis d'hydrates en introduisant une contrainte de cisaillement seuil, c'est-à-dire qu'il est nécessaire de leur appliquer une certaine contrainte minimale pour provoquer leur écoulement. Les coulis d'hydrate de TBAB se comportent alors comme des fluides de Bingham. La validité de cette hypothèse est discutée par la suite.

### 1.2. Indice d'écoulement

Le comportement rhéologique d'un fluide de Bingham est linéaire au-delà de la contrainte de cisaillement seuil (Eq. 3.3-1). Ainsi, l'indice d'écoulement est égal à 1.

$$\begin{cases} \tau - \tau_0 = \mu_0 \dot{\gamma} & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad \text{Eq. 3.3-1}$$

Afin de vérifier que ce modèle de fluide de Bingham est bien adapté pour les coulis d'hydrate de TBAB, c'est-à-dire que son indice d'écoulement vaut 1, nous traçons, comme indiqué dans le Chapitre 2.5 :

$$\ln\left(\frac{D(\Delta P - \Delta P_0)}{4L}\right) = F[\ln(\Gamma_w)] \quad \text{Eq. 3.3-2}$$

Où  $\Delta P_0$  est la pression différentielle critique, c'est-à-dire que la pression différentielle minimale à appliquer entre l'entrée et la sortie de la conduite pour observer un écoulement. Elle est obtenue graphiquement, par extrapolation des mesures expérimentales jusqu'à la vitesse nulle.

Les résultats obtenus pour une solution de TBAB de concentration massique 35% sont présentés sur la Figure 3.3-3. Les droites superposées aux points de mesure expérimentaux sont toutes de pentes égales à 1.

On vérifie ainsi que l'indice d'écoulement des coulis de TBAB peut être considéré comme égal à 1, quelle que soit la fraction volumique en hydrates considérée. Ceci nous permet alors de conforter notre hypothèse de comportement de type fluide de Bingham.

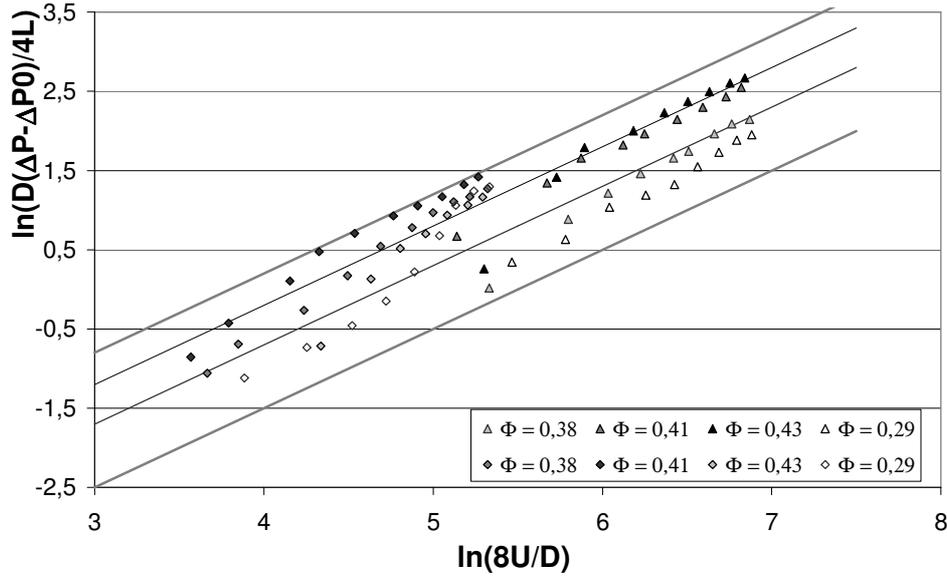


Figure 3.3-3 : Indice d'écoulement des coulis d'hydrates de TBAB ( $x_0=0,35$ )

Des courbes similaires, réalisées pour des solutions de TBAB de différentes concentrations initiales, sont fournies en Annexe 2.

Cette observation est vérifiée pour tous les coulis d'hydrates de TBAB testés. (Annexe 2).

Notons que ce modèle de fluide de Bingham a également été utilisé pour décrire le comportement rhéologique de certains coulis de glace. En particulier, Jensen *et al.* (référéncé par Ayel (2003)), ont observé l'apparition d'une contrainte seuil pour des fractions massiques en glace supérieures à 15%.

### 1.3. Vitesse et contrainte de cisaillement

Le modèle de comportement rhéologique étant choisi, nous sommes capables d'exprimer la vitesse et la contrainte de cisaillement à la paroi sous la forme des Eq. 3.3-3 et Eq. 3.3-4. L'Eq. 3.3-5 donne la relation entre ces deux grandeurs. La contrainte de cisaillement seuil est, quant à elle, reliée à la pression différentielle seuil ( $\Delta P_0$ ) par l'Eq. 3.3-6.

$$\tau_w = \frac{D \Delta P}{4L} \quad \text{Eq. 3.3-3}$$

$$\dot{\gamma}_w = \Gamma_w + \frac{\tau_0}{3\mu_0} \quad \text{si } \tau_0 \ll \tau_w \quad \text{Eq. 3.3-4}$$

$$\mu_0 \dot{\gamma}_w = \tau_w \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right] \quad \text{Eq. 3.3-5}$$

$$\tau_0 = \frac{3}{4} \left( \frac{D \Delta P_0}{4L} \right) \quad \text{Eq. 3.3-6}$$

## 2. Rhéogrammes des coulis d'hydrates de TBAB

### 2.1. Détermination des viscosité apparente et contrainte seuil

La Figure 3.3-4 présente des « pseudo » rhéogrammes (l'abscisse est  $\Gamma_w$  et non pas  $\dot{\gamma}_w$ ) des coulis d'hydrate de TBAB obtenus avec une solution de concentration initiale de 35% en masse.

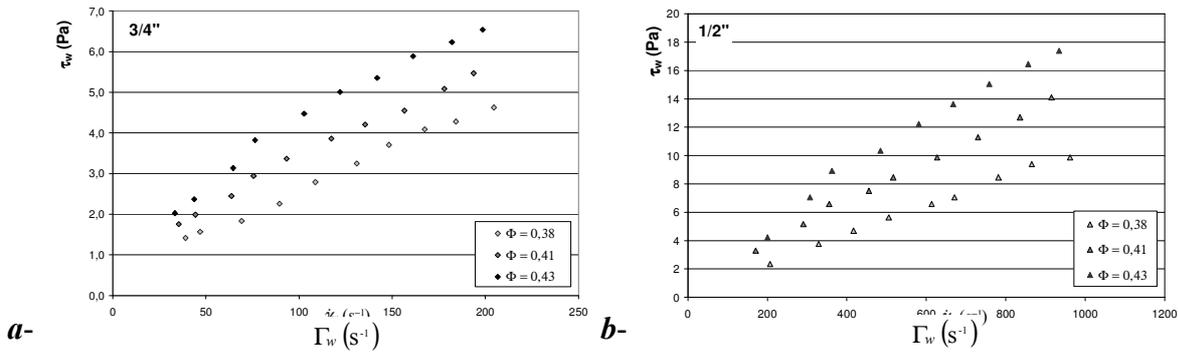


Figure 3.3-4 : "Pseudo"-rhéogrammes des coulis d'hydrates de TBAB

A partir de ce type de diagramme, il nous est possible de déterminer, par régression linéaire, une valeur de la viscosité apparente ainsi qu'une valeur de la contrainte de cisaillement seuil, en fonction de la fraction volumique en particules solides.

En effet, dans la mesure où  $\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right) \ll 1$ , l'Eq. 3.3-5 se simplifie sous la forme de l'Eq. 3.3-7.

$$\tau_w = \frac{4}{3}\tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}_w \quad \text{Eq. 3.3-7}$$

Ainsi, pour un fluide de Bingham, lorsque l'on représente la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement à la paroi, la pente de la droite obtenue est la viscosité apparente du fluide. La contrainte de cisaillement seuil est donnée par l'ordonnée à l'origine (Figure 3.3-5). Nous insistons encore une fois sur le fait que cette contrainte seuil n'est pas déterminée expérimentalement par des essais de redémarrage, mais par extrapolation des mesures réalisées en écoulement.

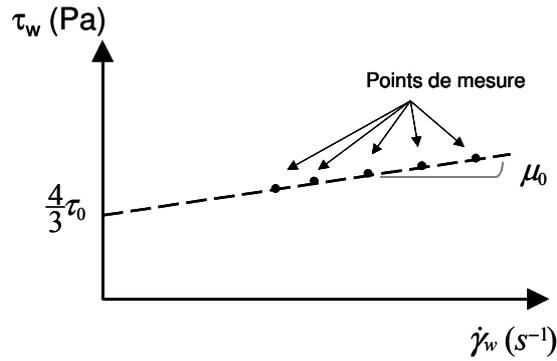


Figure 3.3-5 : Méthode de détermination d'une viscosité apparente et d'une contrainte seuil à partir des données expérimentales

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau de l'Annexe 3. Ce tableau fournit également les masses volumiques de la phase liquide et du coulis ainsi que la viscosité de la phase liquide en fonction de la concentration initiale de la solution et de la fraction volumique en cristaux d'hydrates.

## 2.2. Domaine de validité du modèle précédent

Les deux conditions nécessaires pour que l'Eq. 3.3-7 soit valide sont :

- **H1** : l'écoulement est laminaire ;
- **H2** :  $\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right) \ll 1$  ;
- **H3** : l'écoulement est homogène.

Ceci nous amène à penser qu'il existe un domaine restreint de vitesses de cisaillement  $[\dot{\gamma}_{\min} ; \dot{\gamma}_{\max}]$  à l'intérieur duquel l'Eq. 3.3- décrit bien le comportement des coulis d'hydrates de TBAB.

Pour des vitesses de cisaillement inférieures à  $\dot{\gamma}_{\min}$ , l'hypothèse simplificatrice **H2** n'est plus valable. L'équation complète (Eq. 3.3-) doit permettre de décrire le comportement du fluide. Ce cas se présente plutôt pour des suspensions chargées en particules, pour lesquelles la contrainte de cisaillement seuil est importante. De plus, les performances de la pompe sont telles que, dans ce cas, on peut atteindre de plus faibles vitesses moyennes et, par conséquent, des vitesses de cisaillement moins importantes.

Pour des vitesses de cisaillement supérieures à  $\dot{\gamma}_{\max}$ , l'écoulement atteint le régime de transition laminaire/turbulent et l'hypothèse **H1** n'est plus vraie. L'Eq. 3.3-5 n'est alors plus adaptée pour décrire le comportement des coulis.

Ce cas se présente pour des coulis peu chargés en particules solides, et par conséquent peu visqueux. La transition à la turbulence débute alors à des vitesses moyennes suffisamment faibles pour être observée au cours des essais.

On peut alors observer une déviation des points de mesure correspondant aux vitesses de cisaillement les plus faibles, ou les plus élevées.

Le Tableau 3.3-1 présente les résultats relatifs aux domaines de validité de l'Eq. 3.3-7, en fonction de la concentration de la suspension en particules solides et de la concentration initiale de la solution.

On vérifie, par exemple avec les différentes solutions de TBAB 15% et de TBAB 35%, qu'au fur et à mesure que la teneur en particules solides augmente,  $\dot{\gamma}_{\min}$  augmente également.

D'autre part, pour les solutions de TBAB 20% et de TBAB 35%, on observe que la transition vers la turbulence est repoussée vers des vitesses moyennes de coulis plus importantes lorsque la teneur en particules solides de la solution augmente.

Solution initiale	$\Phi$ [-]	Conduite 3/4 "		Conduite 1/2 "	
		$\dot{\gamma}_{\min}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\dot{\gamma}_{\max}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\dot{\gamma}_{\min}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\dot{\gamma}_{\max}$ [s <sup>-1</sup> ]
TBAB 15%	0,18	<50	>350	<100	>1200
TBAB 15%	0,24	<50	>350	<100	>1200
TBAB 15%	0,26	80	>350	<100	>1200
TBAB 15%	0,28	110	>350	400	>1200
TBAB 20%	0,05	<50	180	-	-
TBAB20%	0,40	<50	>200	-	-
TBAB 35%	0,29	<50	120	<200	610
TBAB 35%	0,38	<50	>200	<200	>1000
TBAB 35%	0,41	70	>200	<200	>1000
TBAB35%	0,43	80	>200	210	>1000

Tableau 3.3-1 : Domaine de validité de l'Eq. 3.3-7

Pour une meilleure évaluation des viscosités apparentes et contraintes seuil, il est alors préférable de considérer les points de mesure réalisés avec les vitesses de cisaillement importantes, en s'assurant tout de même que le régime d'écoulement reste laminaire.

### 3. Influence de la teneur en particules

Nous présentons tout d'abord l'ensemble des figures permettant de visualiser l'évolution des viscosités apparentes et des contraintes seuil en fonction de la teneur en particules. Chaque figure correspond à une concentration initiale en TBAB donnée. Les résultats obtenus sont commentés dans le paragraphe suivant.

#### 3.1. Evolution de la viscosité apparente avec la teneur en hydrates

Les Figure 3.3-6, Figure 3.3-7 et Figure 3.3-8 présentent l'évolution de la viscosité apparente en fonction de la fraction volumique en cristaux, respectivement pour des solutions initiales TBAB 35%, TBAB 15% et TBAB 20%.

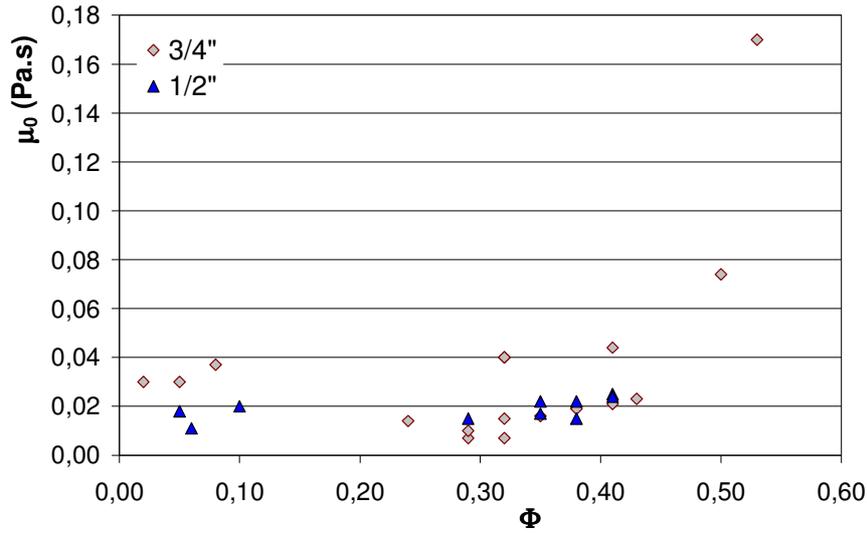


Figure 3.3-6 : Evolution de la viscosité apparente d'un coulis d'hydrate de TBAB de type A ( $x_0=0,35$ ) avec la fraction volumique en solide

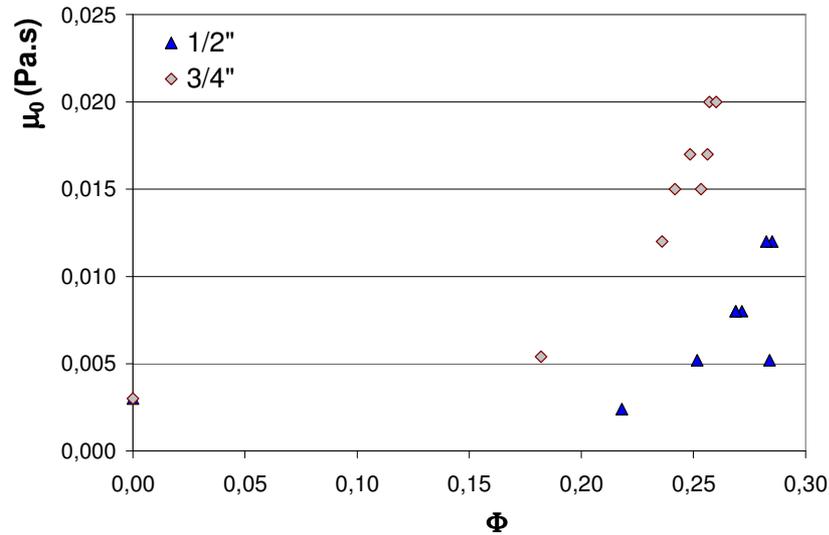


Figure 3.3-7 : Evolution de la viscosité apparente d'un coulis d'hydrate de TBAB de type B ( $x_0=0,15$ ) avec la fraction volumique en solide

Sur les deux figures précédentes, les motifs carrés représentent les résultats obtenus avec la conduite de diamètre 3/4" et les motifs triangulaires ceux obtenus avec la conduite 1/2".

Tous les résultats présentés sur la figure suivante ont été obtenus avec la conduite 3/4", les points foncés avec un coulis d'hydrate de TBAB de type A et les points clairs avec un coulis de TBAB de type B.

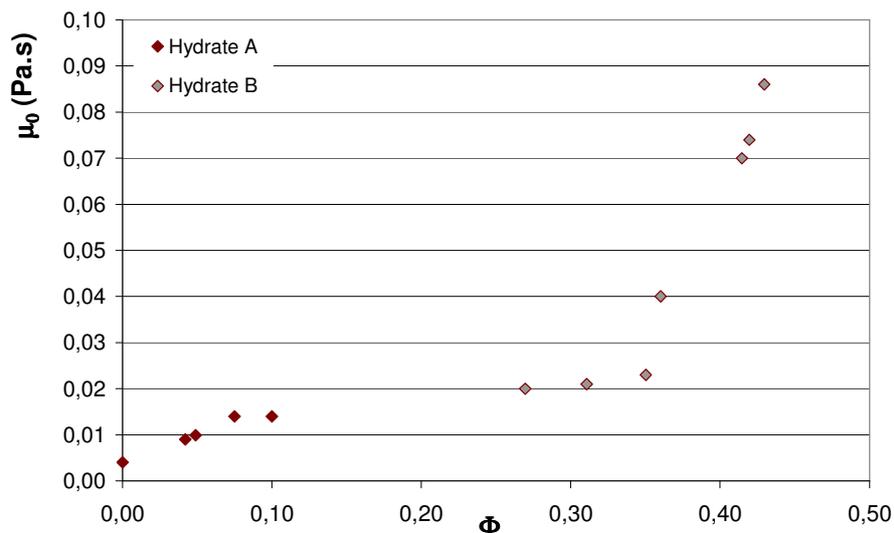


Figure 3.3-8 : Evolution de la viscosité apparente d'un coulis d'hydrate de TBAB en fonction du type d'hydrate en suspension et de sa fraction volumique ( $x_0=0,20$ )

### 3.2. Evolution de la contrainte seuil

Les Figure 3.3-9, Figure 3.3-10 et Figure 3.3-11 présentent l'évolution de la contrainte seuil extrapolée en fonction de la fraction volumique en cristaux, respectivement pour des solutions initiales TBAB 35%, TBAB 15% et TBAB 20%.

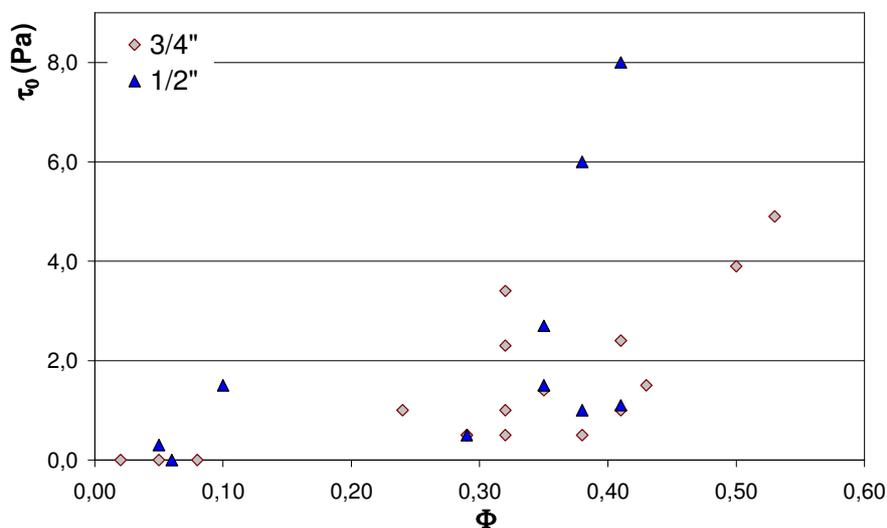


Figure 3.3-9 : Evolution de la contrainte seuil d'un coulis d'hydrate de TBAB de type A ( $x_0=0,35$ ) avec la fraction volumique en solide

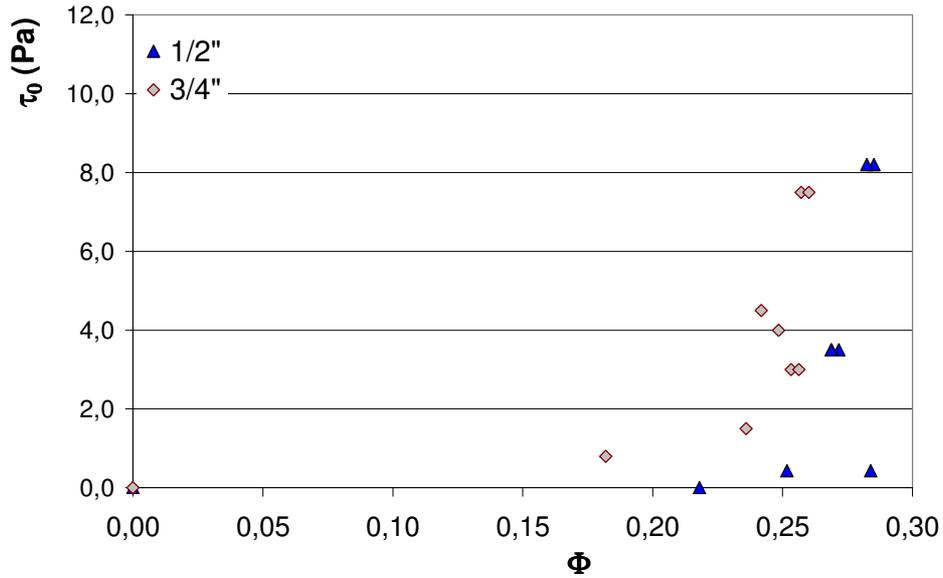


Figure 3.3-10 : Evolution de la contrainte seuil d'un coulis d'hydrate de TBAB de type B ( $x_0=0,15$ ) avec la fraction volumique en solide

Sur les deux figures précédentes, les motifs carrés représentent les résultats obtenus avec la conduite de diamètre 3/4" et les motifs triangulaires ceux obtenus avec la conduite 1/2".

Tous les résultats présentés sur la figure suivante ont été obtenus avec la conduite 3/4", les points foncés avec un coulis d'hydrate de TBAB de type A, et les points clairs avec un coulis de TBAB de type B.

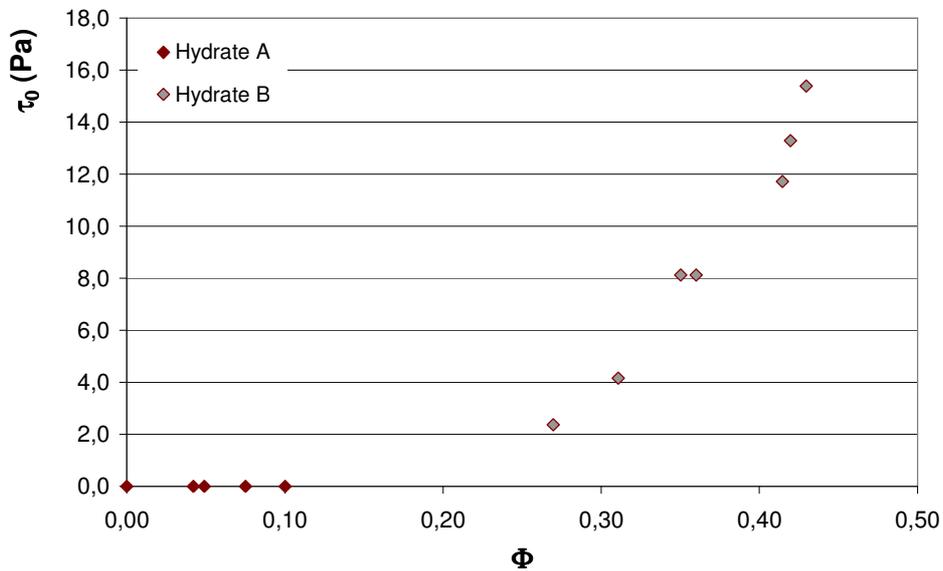


Figure 3.3-11 : Evolution de la contrainte seuil d'un coulis d'hydrate de TBAB en fonction du type d'hydrate en suspension et de sa fraction volumique ( $x_0=0,20$ )

## 4. Discussion

### □ Solutions TBAB 35%

Les résultats obtenus avec cette concentrations initiale sont présentés sur les Figure 3.3-6 et Figure 3.3-9. Dans de telles conditions, seul l'hydrate de type A cristallise. On observe de manière générale que, dans ce cas, la viscosité apparente de la suspension ainsi que la contrainte de cisaillement seuil augmentent avec la teneur en cristaux.

Pour de telles concentrations initiales, nous nous trouvons à proximité du maximum du diagramme d'équilibre des hydrates de TBAB. La température du mélange diphasique varie alors très peu lorsque le coulis se concentre en cristaux. L'incertitude sur l'estimation de la fraction volumique en cristaux est liée à la précision de la mesure de température ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ).

### □ Solution de TBAB 15%

Les résultats obtenus avec une concentration initiale de 15% massique sont présentés sur les Figure 3.3-7 et Figure 3.3-10. Dans ce cas, seule la cristallisation de l'hydrate de type B a été observée.

On constate, comme dans le cas de l'hydrate de type A, que la viscosité apparente et la contrainte seuil de la suspension d'hydrates de type B, augmentent avec la teneur en particules solides. Il semble également que la contrainte seuil de cisaillement reste nulle jusqu'à une certaine teneur en cristaux limite ( $15\% < \Phi_c < 20\%$ ), puis augmente très rapidement avec la teneur en solide.

Pour une telle concentration initiale, nous nous trouvons dans une région du diagramme d'équilibre des hydrates de TBAB où la température varie plus rapidement avec la teneur en cristaux. La précision sur la détermination de la teneur en cristaux est alors meilleure.

### □ Solution de TBAB 20%

Les résultats obtenus dans ce cas sont présentés sur les Figure 3.3-8 et Figure 3.3-11. Nous avons vu précédemment (Chapitre 2.2) que, dans ce cas, les deux types d'hydrates (A et B) peuvent se former successivement. Les apparitions successives de chaque hydrates sont repérées par des sauts de températures. Alors que nous n'avons aucune information *a priori* sur la métastabilité de chacun de ces deux types d'hydrate, leur ordre d'apparition a été déduit du comportement rhéologique des coulis formés. En effet, les deux hydrates diffèrent par leur composition : ainsi, pour une même température, un coulis d'hydrate de type A est moins concentré en particules qu'un coulis de type B. Par comparaison des viscosités apparentes obtenues pour chaque type d'hydrate avec celles obtenues pour un hydrate de type A ( $x_0=0,35$ ), nous en avons déduit que l'hydrate de type A se forme en premier pour ensuite céder sa place à l'hydrate de type B, thermodynamiquement plus stable.

On remarque que pour les très faibles valeurs de fractions volumiques obtenues avec l'hydrate de type A ( $\Phi < 11\%$ ), la suspension conserve un comportement newtonien, puisque sa contrainte seuil de cisaillement reste nulle.