

# **Caractérisation rhéologique des coulis destinés à l'injection des gaines dans les ouvrages en béton précontraint**

Ing. G. Duquesne (1)

Ing. S. Meunier (1)

Ing. N. Wilmotte (2)

Ing. H. Mahouche (2)

(1) ISICHt – Mons

(2) Holcim Belgique

*Holcim Belgique a développé une nouvelle technique de mesure à partir d'un rhéomètre en vue d'une meilleure caractérisation du coulis. Cet article présente la mise au point de cette nouvelle technique d'analyse au rhéomètre et de son application sur des coulis existants. Cette nouvelle approche a pour but de mieux connaître les propriétés des coulis actuels afin de développer dans un futur proche de nouveaux coulis en laboratoire.*

*Mots clés : coulis, rhéologie, viscosité, thixotropie, viscosimètre*

*Holcim Belgium has developed a new measurement technique using a rheometer for a better grout characterisation. This paper presents the development of this new analysis technique and its implementation on existing grout. This new approach aims to better understand the properties of existing grout to develop new grout in laboratories in the near future.*

*Keywords : grout, rheology, viscosity, thixotropy, viscometer*

## 1. Mise en situation

Un coulis est un mélange d'eau, de ciment et d'adjuvant [2] [5] [6] remplissant les gâches des ouvrages en béton précontraint. La mise en place de coulis permet la passivation. Les torons, donnant la résistance aux structures en béton précontraint, sont ainsi protégés de la corrosion en expulsant l'air des gâches [7]. C'est pourquoi la bonne connaissance du comportement des coulis est indispensable. Ce comportement du coulis pendant et après la mise en place est déterminé à partir de ses propriétés.



*Figure 1 : Gâche avec les torons d'un ouvrage en béton précontraint [7].*

A l'heure actuelle, la viscosité d'un coulis, une de ses propriétés, est normée par l'utilisation du Cône de Marsh [7] [8]. Cette méthode de mesure est modique et demande peu de ressources. Celle-ci est adaptée pour le chantier. Elle permet de mesurer la fluidité des coulis exprimée en secondes. Une quantité de 1500 ml de coulis est disposée dans un cône de Marsh. Nous mesurons le temps de passage de 1000 ml de coulis au travers d'un ajustage de 10 mm de diamètre et de 60 mm de longueur [7] [8]. Plus l'écoulement est rapide plus le coulis est fluide.

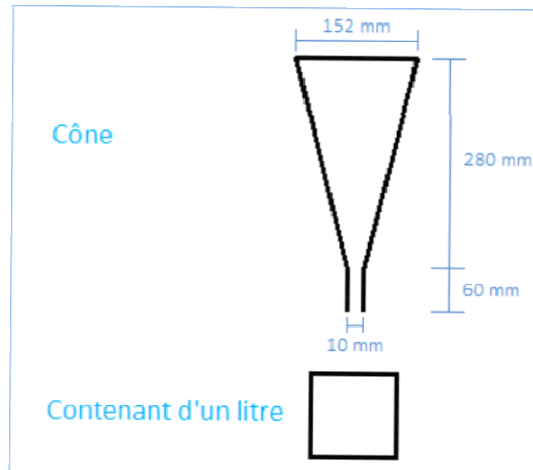


Figure 2 : Schéma d'un cône de Marsh.

En laboratoire de recherche, afin de développer de nouveaux coulis cette technique n'est plus suffisante. C'est pourquoi, depuis un certain temps, le site d'Holcim a acquis un rhéomètre afin d'approfondir la caractérisation des propriétés rhéologiques des coulis [4]. Les propriétés approfondies sont la viscosité et la thixotropie.

La viscosité est définie comme la résistance d'un fluide à son écoulement [1] [8] [12].

La thixotropie est une propriété que l'on retrouve dans certains gels, fluides ou mélanges renfermant des solides (béton, coulis, ...) et qui ont la particularité de pouvoir passer de l'état liquide à l'état solide et inversement [1] [12].

La suite de cet article traitera de la mise en place d'un protocole d'analyse au rhéomètre et de son application sur des coulis existants.

## 2. Mise au point de la procédure d'analyse au rhéomètre

### 2.1. Description des appareillages utilisés

Différentes géométries peuvent être installées sur le rhéomètre. Le laboratoire possède trois types de mobile ; le plan-plan (20 mm et 40 mm),

le cône-plan (60 mm) et les cylindres concentriques. Le choix d'une géométrie est fonction de la viscosité de l'échantillon à analyser [12].

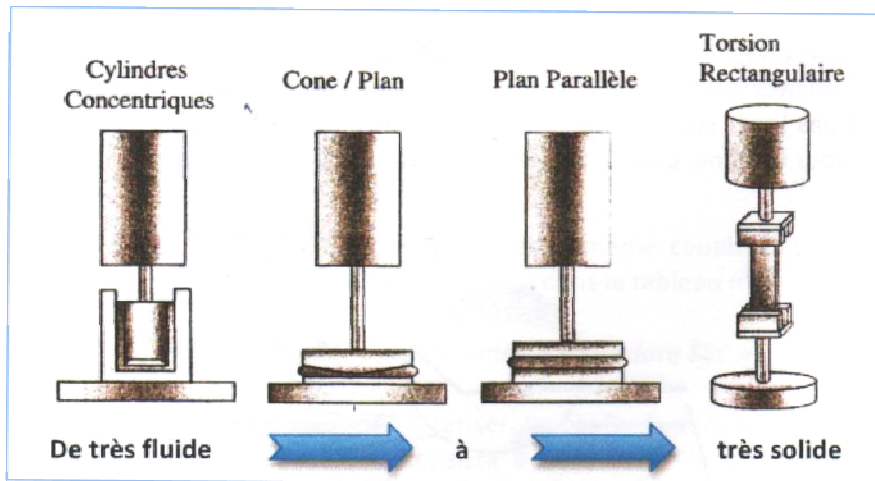


Figure 3 : Détermination de la géométrie en fonction de la viscosité (fluidité).

## 2.2. Détermination du type de procédure appliquée au rhéomètre

Il existe différents types de procédure pour pouvoir caractériser un coulis. Nous pouvons appliquer soit une contrainte, soit un taux de cisaillement, ou encore un couple ou une vitesse angulaire [12].

Nous comparons deux procédures différentes qui ont été mises en place dans le travail « Impact de l'interaction régulateur de prise-adjuvant sur la rhéologie ». La première où le rhéomètre AR2000 applique une contrainte et mesure le taux de cisaillement. La seconde où le rhéomètre applique un couple et mesure le taux de cisaillement. Cette procédure est testée avec une géométrie plan-plan 40 mm.

Procédure n°1 : analyse d'un coulis superstresscem<sup>®</sup> imposant une contrainte :

Montée : rampe continue de 0,1 à 100 Pa pendant 3 minutes

Palier : 100 Pa pendant 1 minute

Descente : rampe continue de 100 à 0,1 pendant 3 minutes

Procédure n°2 : analyse d'un coulis superstresscem<sup>®</sup> imposant un couple :  
 Montée : rampe continue de 0,1 à 2000  $\mu\text{Nm}$  pendant 3 minutes  
 Palier : 2000  $\mu\text{Nm}$  pendant 1 minute  
 Descente : rampe continue de 2000 à 0,1  $\mu\text{Nm}$  pendant 3 minutes

Seules les descentes sont comparées car les montées sont parfois sujettes à des différences de mesures en début de courbes dues à une mauvaise homogénéisation des échantillons. Dans le reste de ce travail seules les descentes seront prises en compte.

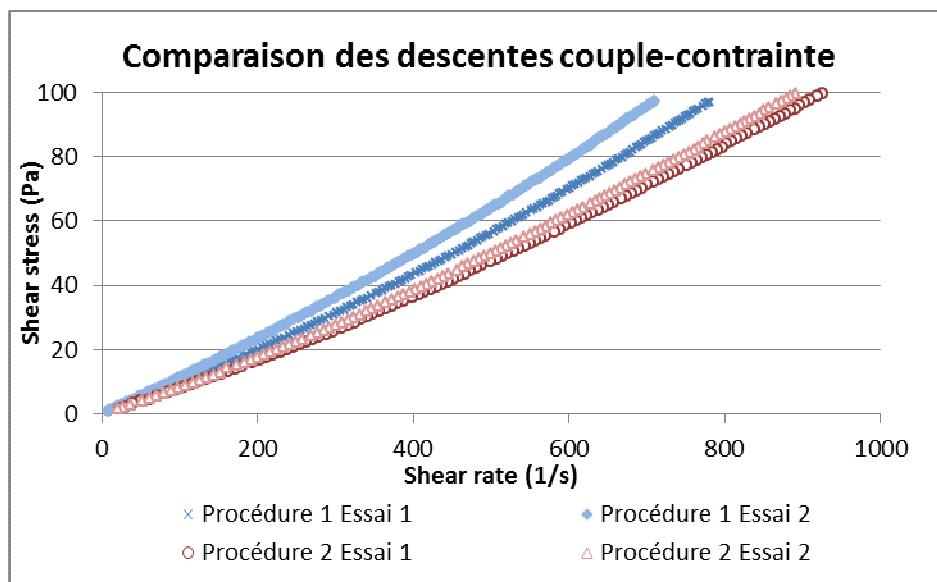


Figure 4 : Graphique de comparaison entre la procédure imposant un couple et celle imposant une contrainte

L'écart à 100 Pa, sur le graphique, entre les deux essais pour une même procédure est plus faible pour la seconde que pour la première. De ce fait, la seconde procédure possède une répétabilité meilleure. C'est pourquoi nous optons pour la seconde procédure imposant un couple.

### 2.3. Détermination de la géométrie et du gap

Après avoir réalisé plusieurs essais sur les géométries avec différents gaps, deux séries d'essais reproductibles sont retenus.

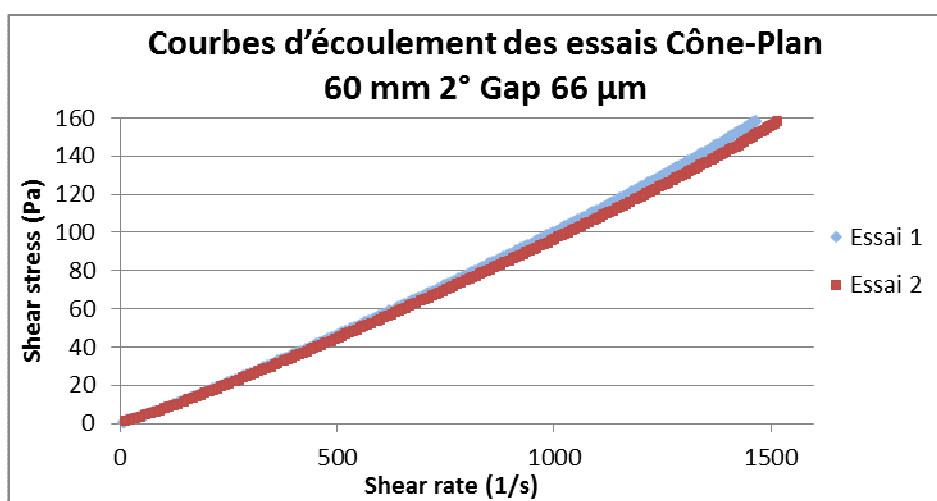


Figure 5 : Courbes d'écoulement des essais Cône-Plan 60 mm 2° Gap 66 µm.

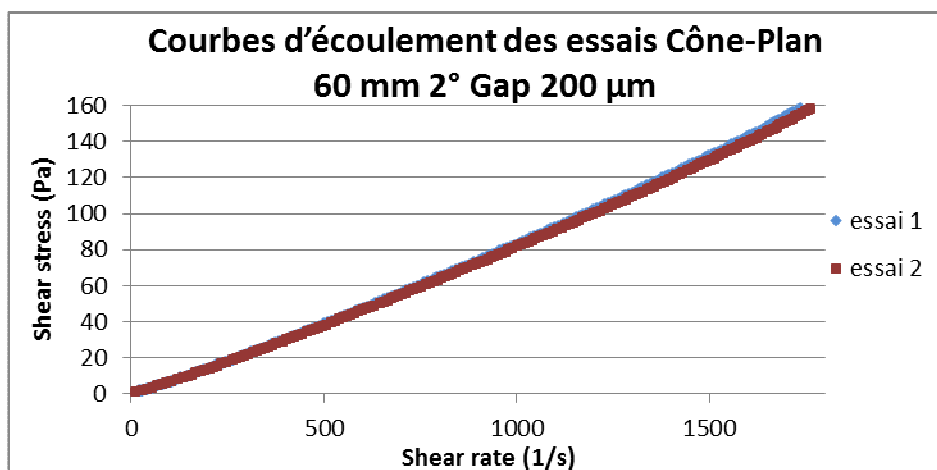


Figure 6 : Courbes d'écoulement des essais Cône-Plan 60 mm 2° Gap 200 µm.

	cône-plan 60 mm 2° gap 200 µm	plan-plan 40 mm gap 1000 µm
Ecart à 150 Pa entre les essais	28 s <sup>-1</sup>	36 s <sup>-1</sup>
Domaine de mesure Shear rate	0 à 1765 s <sup>-1</sup>	0 à 1303 s <sup>-1</sup>
Contact du coulis à 5°C	Facile	Difficile

*Tableau 1 : Comparaisons entre le mobile cône-plan et le mobile plan-plan.*

Nous travaillerons avec le cône-plan 60 mm 2° gap 200 µm car :

- Les essais réalisés montrent une bonne reproductibilité. Nous avons un écart de 28 s<sup>-1</sup> entre les mesures à une contrainte de 150 Pa contre 36 avec le plan-plan.
- Le domaine de mesure est plus large avec le cône-plan qu'avec le plan-plan.
- A des températures proches de 5°C, le contact du coulis avec le mobile est plus facile avec le cône-plan qu'avec le plan-plan.

#### **2.4. Détermination de la valeur maximale du couple à imposer**

Pour empêcher les éclaboussures, la valeur maximale du couple à imposer est déterminée. Les essais sont réalisés dans les conditions les plus extrêmes pour obtenir le coulis le plus fluide. Le superstresscem<sup>®</sup> a une température de 35°C avec un rapport d'eau/ciment à 0,39.

Après de nombreux essais, la valeur maximale du couple que nous obtenons est de 6000 µNm.

#### **2.5. Validation de la procédure**

La procédure testée est la suivante :

Une rampe continue de 0,1 à 6000 µNm pendant deux minutes

Un palier à 6000 µNm pendant une minute

Une descente continue de 6000 à 0,1 µNm pendant deux minutes

Cette procédure utilise le mobile Cône-Plan 60mm 2° avec un gap de 200  $\mu\text{m}$ .

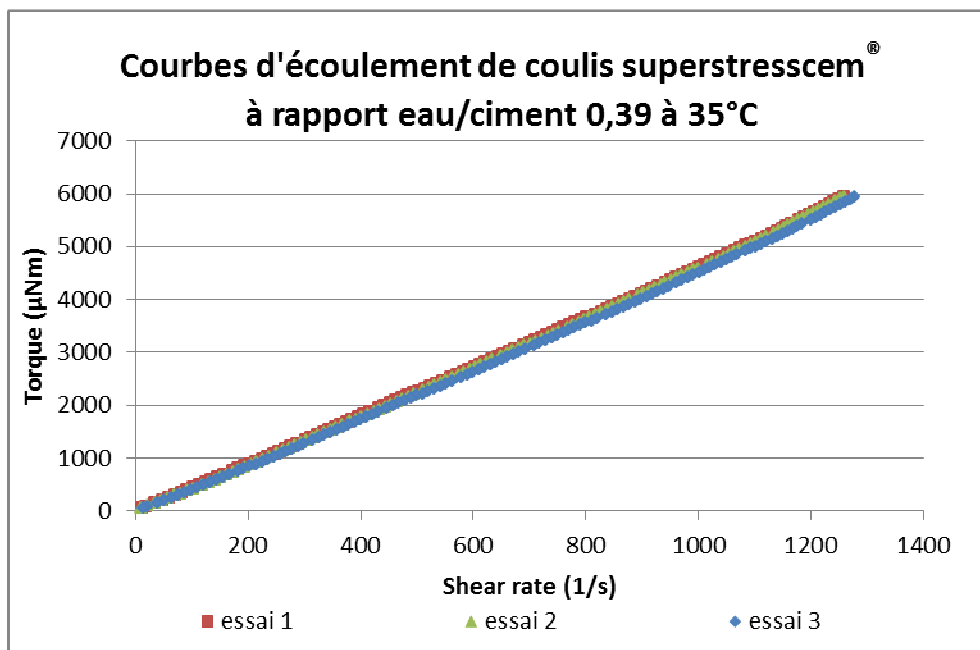


Figure 7 : Courbes d'écoulement de coulis superstresscem<sup>®</sup> à E/C 0,39 à 35°C.

Les résultats obtenus, disposés sur ce graphique, permettent de valider la procédure de par la reproductibilité des essais.

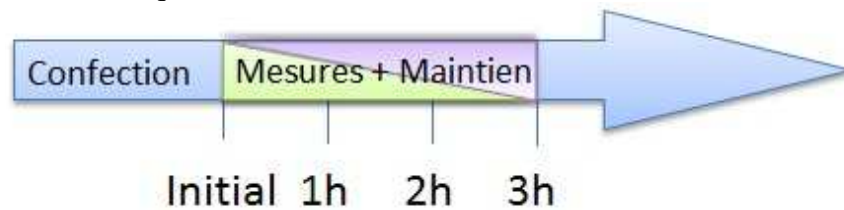
### 3. Application au coulis existant

#### 3.1. Caractérisation du superstresscem<sup>®</sup> dans le temps

Les propriétés connues du superstresscem<sup>®</sup> sont une fluidité de Marsh inférieure à 25 secondes pendant deux heures après la confection, un temps de prise supérieur à 3 heures et un temps de fin de prise inférieur à 24 heures pour des coulis avec un rapport E/C (eau/ciment) de 0,37 à 0,39 [7].



Dès lors, nous réalisons des suivis rhéologiques sur une durée de trois heures sur des coulis de superstresscem<sup>®</sup> maintenus en agitation. Les mesures sont réalisées toutes les heures au rhéomètre et au cône de Marsh. Le coulis est gardé à température constante durant toutes les mesures dans une salle climatique.



Trois E/C et trois températures sont testés.

A partir des données recueillies, nous constatons que :

- La viscosité du coulis superstresscem<sup>®</sup> augmente avec le temps.
- La viscosité à un E/C de 0,39 augmente légèrement dans le temps. Tandis qu'aux E/C de 0,37 et 0,38, la viscosité augmente plus vite.
- Nous concluons que plus le rapport eau/ciment est petit, plus l'augmentation de la viscosité s'effectue rapidement.
- L'évolution de la viscosité dans le temps est plus rapide pour des températures plus élevées. Cette évolution est logique. En effet, la gélification est plus rapide. Celle-ci rend le coulis plus vite visqueux.
- Plus le rapport en eau est grand, plus le coulis est stable dans le temps.
- La fluidité augmente d'autant plus vite dans le temps avec l'augmentation de la température et la diminution du rapport eau/ciment.

En traçant le graphique de la fluidité en fonction de la viscosité, nous remarquons que nous obtenons une corrélation de type linéaire. De par cette relation, nous pouvons déterminer la viscosité à  $200 \text{ s}^{-1}$  à partir de la fluidité d'un coulis superstresscem<sup>®</sup> maintenus en agitation.

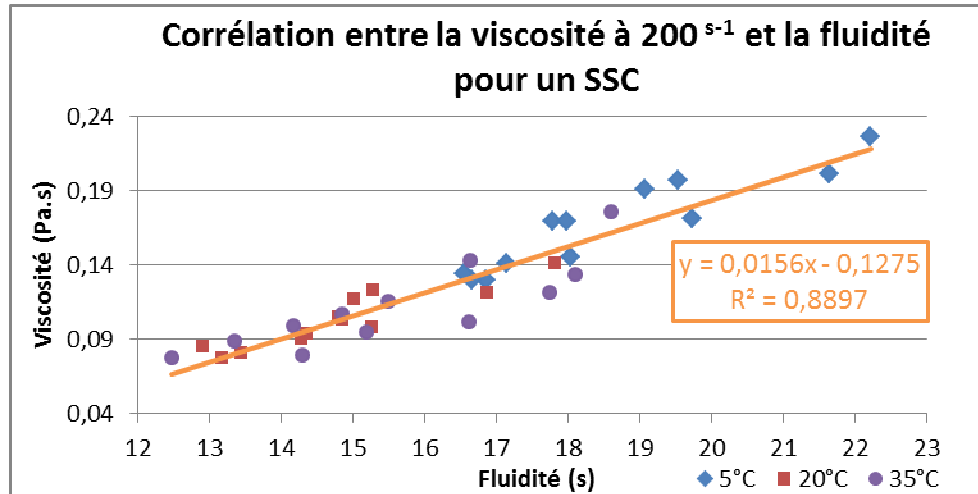


Figure 8 : Corrélation de la viscosité à 200 s<sup>-1</sup> et de la fluidité d'un *superstresscem*<sup>®</sup>.

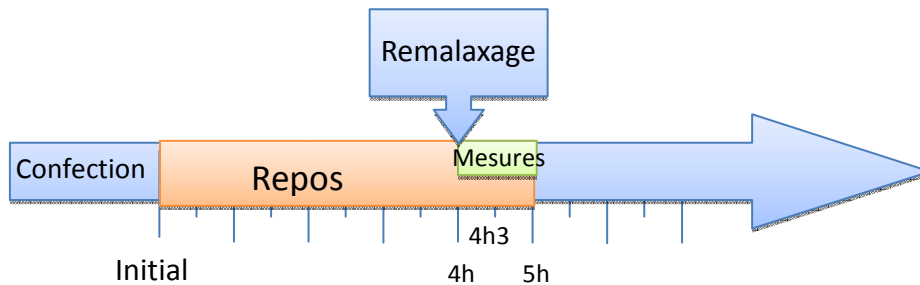
### 3.2. Caractérisation du *superstresscem premium*<sup>®</sup> dans le temps sans maintien en agitation

Le *superstresscem premium*<sup>®</sup> a été conçu pour des chantiers empêchant le maintien en agitation du coulis.

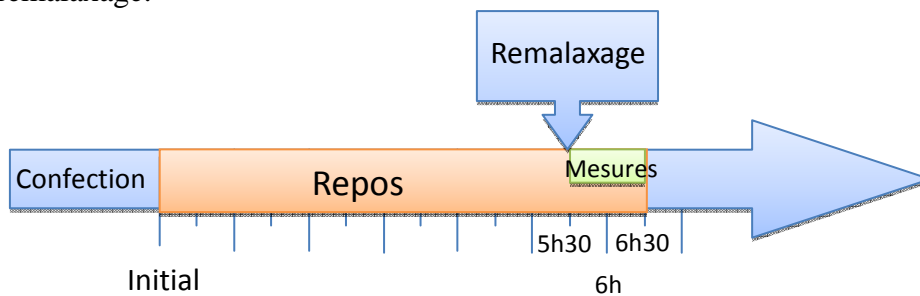
Les propriétés connues du *superstresscem premium*<sup>®</sup> sont une fluidité de Marsh inférieure à 25 secondes pendant six heures après la confection et un temps de prise supérieur à 6 heures.

Dès lors, nous réalisons deux séries de mesures sur des coulis *superstresscem premium*<sup>®</sup> (SSC P) dans le temps pour définir leurs caractéristiques.

Sur la première gâchée, nous effectuons les mesures après la confection, à 4h00, avant et après le remalaxage (5 minutes à 1500t/min), à 4h30 et à 5h00. Seules la viscosité et la thixotropie sont mesurées avant le remalaxage.



Sur la seconde, nous effectuons les mesures après la confection, à 5h30 avant et après le remalaxage (8 minutes à 1500t/min), à 6h00 et à 6h30. Seules la viscosité et la thixotropie sont mesurées avant le remalaxage.



A partir des données recueillies, nous constatons que :

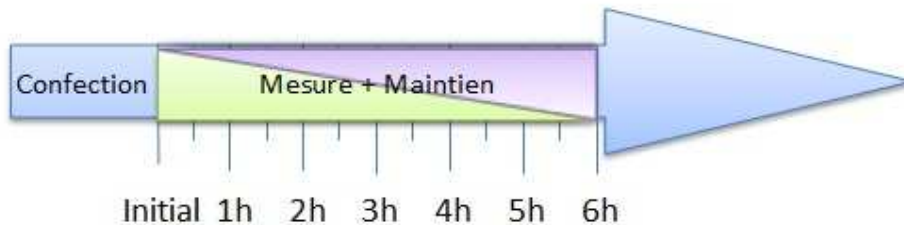
- La viscosité d'un coulis laissé au repos est croissante. Une fois le remalaxage effectué, la viscosité diminue. Ensuite, la viscosité est constante durant une heure. Un remalaxage permet de supprimer l'augmentation de viscosité du coulis au repos.
- La viscosité d'un coulis SSC P est plus grande pour une teneur en eau faible.
- La température affecte la gélification du coulis. Plus le coulis est chaud, plus la gélification est rapide rendant le coulis moins fluide donc plus visqueux avec le temps.
- La viscosité du coulis SSC P est plus faible pour des hautes températures.
- La fluidité diminue après un remalaxage. Celle-ci réaugmente lorsque le SSC P est au repos.

- La fluidité est plus importante pour une faible teneur en eau.
- La fluidité du coulis SSC P est plus faible pour de hautes températures.
- Pendant le repos du coulis SSC P, la thixotropie augmente. Celle-ci diminue lorsque le coulis est agité. Après agitation, le coulis SSC P est de nouveau au repos augmentant la thixotropie du coulis.
- La thixotropie du coulis SSC P est plus importante pour de hautes températures.

Pour ces essais, il n'existe pas de relation entre la viscosité et la fluidité au cône de Marsh.

### 3.3. Caractérisation du superstresscem premium<sup>®</sup> dans le temps avec maintien en agitation

Un suivi rhéologique est réalisé sur une durée de six heures sur un coulis de superstresscem premium<sup>®</sup> maintenu en agitation à 20°C et à E/C 0,38. Les mesures sont réalisées toutes les heures au rhéomètre et au cône de Marsh. Le coulis est gardé à température constante durant toutes les mesures.



A partir des données recueillies, nous constatons que :

- La viscosité du coulis SSC P avec un maintien en agitation croît linéairement dans le temps.
- La fluidité du coulis SSC P avec maintien en agitation évolue dans le temps. La fluidité est croissante linéairement.

Dans cet essai, il existe une corrélation entre la viscosité et la fluidité au cône de Marsh pour un coulis SSC P.

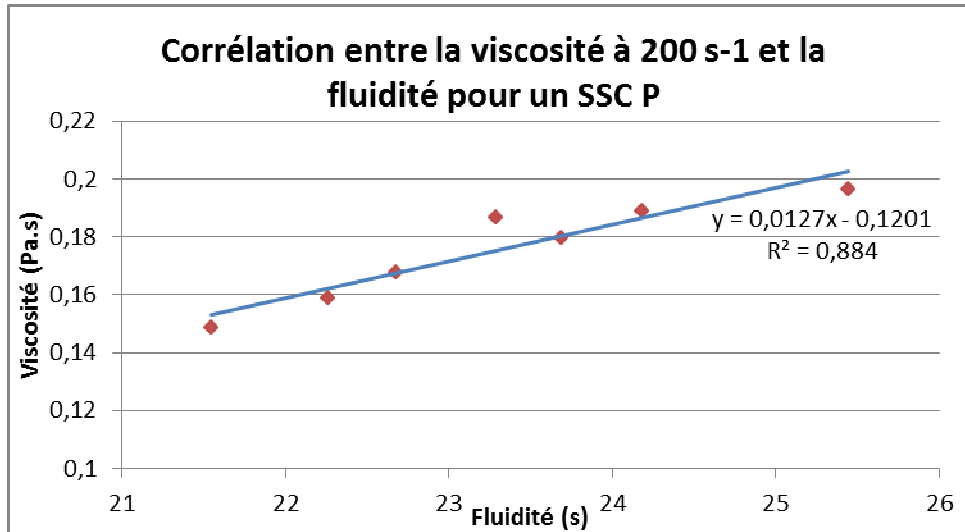


Figure 9 : Corrélation de la viscosité à 200 s<sup>-1</sup> et de la fluidité d'un *superstresscem premium*<sup>®</sup>.

## 4. Conclusions

### 4.1. Mise en place d'un protocole d'analyse

Cette étude nous a permis de déterminer les différents paramètres à mettre en place pour effectuer une analyse au rhéomètre :

- Le choix du mobile et de l'entrefer
- La procédure de mesure au rhéomètre

#### **Le choix du mobile et de l'entrefer**

Le type et la taille du mobile dépend de l'échantillon à caractériser [12]. Plus la viscosité de l'échantillon est petite, plus la surface du mobile doit être grande. On opte pour le choix d'une géométrie cylindrique apportant une grande surface de contact pour de faibles viscosités. Tandis que pour de grandes viscosités, on choisit une géométrie de type plan-plan apportant une surface de contact plus faible.

La taille de l'entrefer dépend de la plus grande particule présente dans l'échantillon. Celui-ci doit être au minimum cinq à dix fois plus grand [12].

### La procédure de mesure au rhéomètre

Pour déterminer la thixotropie par l'intermédiaire de la surface entre deux courbes, la procédure au rhéomètre est constituée d'une montée, d'un plateau et d'une descente. La mesure maximale à imposer au rhéomètre est déterminée pour empêcher l'échantillon d'éclabousser.

### 4.2. La caractérisation de coulis

L'applicabilité du protocole d'analyse a permis de mettre en évidence plusieurs propriétés de coulis.

- La viscosité d'un coulis à la confection diminue avec l'augmentation de la température et du rapport eau/ciment.
- La viscosité d'un coulis au repos et en agitation augmente avec le temps.
- L'évolution de la viscosité dans le temps est plus rapide pour des températures élevées et des rapports eau/ciment faibles. La gélification s'effectue plus rapidement.
- La fluidité d'un coulis augmente avec la diminution du ratio eau/ciment et la température.
- La fluidité augmente dans le temps. Celle-ci évolue d'autant plus vite que la température est grande ou/et le ratio en eau/ciment est petit.
- La thixotropie d'un coulis au repos augmente avec le temps. Celle-ci diminue lorsque le coulis est agité.
- La thixotropie d'un coulis est plus importante pour de hautes températures.
- Une corrélation entre la viscosité et la fluidité existe pour un coulis maintenu en agitation.

	↑ E/C	↑ Température	Temps (en agitation)	Temps (au repos)
<b>Viscosité</b>	↓	↓	↑	↑
<b>Fluidité</b>	↓	↓	↑	↑
<b>Thixotropie</b>	↑	↑		↑

Tableau 2 : Evolution des propriétés d'un coulis en fonction d'E/C, de la température et du temps.

La caractérisation des coulis Superstresscem<sup>®</sup> et Superstresscem premium<sup>®</sup> par le rhéomètre et par le cône de Marsh, nous a permis de déterminer une corrélation entre la fluidité et la viscosité. La corrélation obtenue pour le Superstresscem<sup>®</sup> et le Superstresscem premium<sup>®</sup> est différente. Ceci implique que chaque coulis possède sa propre corrélation fluidité - viscosité. C'est pourquoi nous ne pouvons pas remplacer les essais effectués au cône de Marsh par le rhéomètre. Le rhéomètre est une technique complémentaire au cône de Marsh pour caractériser les coulis.

## 5. Sources

- [1] BARNES H., 2000, *A Handbook of elementary rheology*  
Aberystwyth, University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid
  
- [2] CIMENTS CALCIA, octobre 2001, *La fabrication du ciment*  
France, Studio1
  
- [3] DUQUESNE G., 2012, Travail de fin d'étude : *Caractérisation rhéologique des coulis destinés à l'injection des gaines dans les ouvrages en béton précontraint*  
Mons, HELHa
  
- [4] FABRE P. et LALUET J., 1989, *La rhéologie : un outil indispensable pour la formulation actuelle*  
France, Coatex
  
- [5] FSHBZ, avril 2007, *Adjuvants pour béton et environnement : des questions précises, des réponses précises*  
Suisses, FSHBZ
  
- [6] GAREL F. et LEGRAND N. (AXIM), juin 2008, *Nos activités : Les adjuvants au service du béton*  
France, AXIM Italcementi group

- [7] Holcim, *SUPERSTRESSCEM® : Un couple ciment-adjuvants homologué pour la réalisation de coulis destinés à l'injection des gaines des ouvrages en béton précontraint*  
Holcim (France) S.A.
- [8] MARTIN M. (coordinateur), 1979, *Manuel de rhéologie des fluides de forage et laitiers de ciments*  
Paris, Technip
- [9] Materials & Applications Center, Holcim Western Europe, 1<sup>ère</sup> édition 2007, *Guide pratique : Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables*  
Holcim (Belgique) S.A.
- [10] MILTIADOU A. E., 1992, *Etude des coulis hydrauliques pour la répartition et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie*  
Paris, LCPC
- [11] NGUYEN V., REMOND S. & GALLIAS J., *Influence of cement grouts composition on the rheological behavior*  
Pour la science, 41/3, mars 2011, pp. 292-300
- [12] TA Instruments, 2010, *théorie et pratique de la rhéologie*  
France, TA Instruments