

Titre: Étude des propriétés rhéologiques de résidus miniers densifiés
Title:

Auteur: Drissa Ouattara
Author:

Date: 2011

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ouattara, D. (2011). Étude des propriétés rhéologiques de résidus miniers densifiés [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/560/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/560/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Mamert Mbonimpa, & Tikou Belem
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DE RÉSIDUS MINIERES
DENSIFIÉS

DRISSA OUATTARA

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

AVRIL 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DE RÉSIDUS MINIERS DENSIFIÉS

présenté par : OUATTARA Drissa

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SIMON Richard, Ph.D., président

M. MBONIMPA Mamert, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BELEM Tikou, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. LI Li, Ph.D., membre

DÉDICACE

Je dédie ce travail à mon père qui a forgé en moi le désir d'approfondissement de mes compétences et l'élargissement des connaissances comme sources de satisfaction et d'accomplissement de l'Homme.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon Directeur de recherche Monsieur Mamert, Mbonimpa qui a su m'initier aux exigences d'analyse et à la perspicacité qui caractérisent le domaine scientifique. Votre sens de compréhension des besoins des étudiants et votre disponibilité constante m'a beaucoup rassuré tout au long de la conduite de ce projet.

Ma gratitude va à l'endroit de mon Codirecteur Monsieur Tikou Belem. Vous avez cru en moi et vos conseils clairs et pertinents m'ont éclairé tout au long de ce parcours. Nos discussions formelles et informelles en rapport avec mon sujet ont enrichi ce travail. J'ai également trouvé un cadre familial très chaleureux dans lequel je pouvais faire irruption à tout moment et trouver la bonne humeur pour noyer ma solitude.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers monsieur Ammar Yahia, mon «hôte scientifique» à l'Université de Sherbrooke pour la supervision de mes travaux. Vous n'avez ménagé aucun effort pour m'assurer le bon déroulement de mes travaux, aussi bien sur le plan académique que social tout au long de notre séjour de recherche. Vos conseils et suggestions m'ont été d'un grand apport dans la réalisation et l'interprétation de certains tests. Je remercie toute l'équipe de recherche en béton de l'université de Sherbrooke qui m'a accueilli pour une partie de mes essais particulièrement le professeur Kamal H. Kayat, titulaire de la chaire industrielle de recherche CRSNG sur le béton à rhéologie adaptée haute performance et le professeur Richard Gagné, Directeur Adjoint du CRIB.

Mes remerciements vont aussi aux professeurs Mostafa Benzaazoua et Bruno Bussière, respectivement titulaires des chaires de recherche du Canada sur la «Gestion intégrée des rejets miniers par remblayage» et sur la «Restauration des sites miniers abandonnés». Leur intérêt sur les états d'avancement de mes travaux à travers certaines interactions ont été très appréciables dans l'aboutissement de ce projet.

Que les membres de la direction de l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM), monsieur Denis Bois et mesdames Louise Labbé et Karen Boileau-Légaré soient vivement remerciés pour leur soutien. Mes vifs remerciements vont aussi à tous les techniciens de l'URSTM avec lesquels j'ai beaucoup interagi durant l'accomplissement de ce projet.

Mes remerciements et reconnaissances vont également à des professeurs de l'UQAT tels que Guyh Dituba NGoma, René Wamkeue et Augustin Ependa.

Je remercie, bien entendu, toute ma famille au Burkina Faso pour la patience dont elle a fait preuve et qui n'a eu de cesse qu'à m'encourager.

Je n'oublie pas l'ensemble de mes camarades étudiants des cycles supérieurs, aussi bien en foresterie et sciences du bois qu'en mines et géologie, que j'ai côtoyés avec grand plaisir tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

L'industrie minière connaît ces dernières années un essor mondial exceptionnel consécutif à l'évolution des cours mondiaux des métaux. Le niveau élevé des prix des métaux a favorisé l'exploitation de gisements à faible teneur en métaux souvent restés inexploités à cause des conjonctures économiques défavorables. Toutefois, la mise en exploitation de gisements miniers à faible teneur de coupure est à l'origine de la production d'importante quantité de rejets solides, liquides et gazeux. Cela est attribuable au fait que pour obtenir une même quantité appréciable de substances utiles, les gisements à faible teneur nécessitent l'extraction et le traitement de quantités plus importantes de minerais que dans le cas de gisements à forte teneur. Ces grandes quantités de rejets issues de cette industrie doivent être gérées de manière responsable. En raison des exigences environnementales de plus en plus restrictives, l'industrie minière est obligée d'améliorer de manière constante ses pratiques de gestion de ses rejets. La recherche entreprise dans le domaine de l'environnement minier ces dernières décennies a conduit à la mise en place de techniques de gestion efficaces de réduction, voire d'élimination, de certains impacts néfastes. Dans le registre de la gestion efficace, on peut citer l'avènement des techniques de densification en réponse aux problèmes de grande taille des parcs à résidus et aux risques de rupture des digues de retenue. Cette technique consiste à accroître le pourcentage solide des résidus en procédant à un retrait d'eau grâce à des épaisseurs de grandes performances et de filtres. Par conséquent, cette technique permet d'améliorer les caractéristiques hydrogéotechniques des résidus tout en permettant un recyclage important de l'eau, ce qui constitue un avantage réel surtout dans les régions à climat aride ou glacial. En fonction des pourcentages de solides des résidus densifiés produits, on distingue les résidus épaissis ayant un pourcentage de solides supérieur à 50% et inférieur à 70%, les résidus en pâte dont le pourcentage de solides est compris entre 70% et 85% et les résidus filtrés présentant un pourcentage de solides très élevé, supérieur à 85%. Notons que les résidus à l'état de pâte peuvent être utilisés dans les remblais cimentés en pâte et servir au remblayage des excavations dans les exploitations souterraines.

En revanche, cette technique de densification des résidus, en dépit des avantages ci-dessus cités, est à l'origine de problèmes associés à leur transport adéquat (résidus épaissis et en pâte) au lieu

de déposition par pipelines (les résidus filtrés sont transportés par camions ou convoyeurs). En effet, les résidus à l'état dense sont des fluides non-newtoniens à l'opposé des résidus non densifiés dont le pourcentage de solides varie de 30 à 45%. Le design d'un système de transport de fluide non-newtonien implique la connaissance des paramètres rhéologiques (le seuil de cisaillement et la viscosité) qui vont contrôler l'écoulement à travers un réseau de distribution en pipelines. Pour une optimisation du transport des résidus densifiés (épaissis et en pâte), cette étude porte sur la détermination de leurs propriétés rhéologiques a été menée sur deux types de résidus provenant des mines Doyon et LaRonde. Ainsi, l'effet des propriétés des résidus et l'influence de l'ajout de certains types d'agents liant à différentes proportions ont été étudiés.

Pour s'assurer d'effectuer des mesures fiables, une première phase du projet a consisté à la validation des procédures expérimentales utilisant le rhéomètre rotatif AR2000 de TA Instruments. Cette phase portait sur l'évaluation de plusieurs procédures telles que le « *continuous ramp flow* » (écoulement à rampe continue), le « *steady state step flow* » (écoulement avec palier d'état d'équilibre) et le « *stepped flow step* » (écoulement à palier renforcé) pour les essais en mode écoulement et les procédures de « *frequency sweep* » (balayage fréquentiel) et de « *stress sweep* » (variation de contrainte) pour les essais en mode dynamique. Ces procédures ont été appliquées pour le calibrage du rhéomètre par l'usage de fluides standards newtoniens et non-newtonien. Toutes ces procédures ont permis un calibrage exact et la procédure de *continuous ramp flow* a été sélectionnée pour la suite des essais en raison de sa relative rapidité. Dans l'optique de conforter les procédures de mesure sur le rhéomètre AR 2000, les mesures ont été validées par comparaison des résultats obtenus sur un autre appareil équipé d'une géométrie co-axiale, en l'occurrence le viscosimètre ConTec de l'Université de Sherbrooke, pour des recettes identiques des résidus et de remblais. Le bon accord entre les résultats des deux appareils a confirmé que la procédure adoptée de *continuous ramp flow* est appropriée.

Dans la 2^e phase du projet, les mesures ont été réalisées pour évaluer les effets des types d'agents liant ainsi que de leurs proportions sur les propriétés rhéologiques, de même que l'effet de l'âge des échantillons après le malaxage résidus-liant-eau. Les résultats montrent que les liants ont

tendance à accroître les paramètres rhéologiques à la fois par le simple fait de leur ajout aux rejets que par l'effet du temps de cure. En effet, le seuil de cisaillement et la viscosité sont nettement plus élevés avec les rejets cimentés (remblais) même à l'âge de 10 min comparativement aux résidus simplement épaissis sans liant. Aussi, un comportement thixotropique a été observé avec les résidus et remblais étudiés. Les données rhéologiques ont été corrélées avec les résultats obtenus à l'aide d'outils simples comme le mini-cône, le petit cône d'Abrahms et le *V-funnel* (entonnoir en V). Les régressions linéaires de ces corrélations ont donné des équations avec des coefficients de détermination acceptables.

La procédure de calcul des paramètres d'écoulement des fluides non-newtoniens dans les pipelines, notamment la perte de charge et la vitesse d'écoulement, développée par Hallbom (2008) a été appliquée sur quelques recettes des résidus et des remblais de la mine Doyon à 70% de solides. Les résultats montrent que les pertes de charge unitaire augmentent avec le seuil de cisaillement.

L'effet d'un superplastifiant le glenium 3030NS visant à améliorer les propriétés rhéologiques des résidus aux pourcentages de solides supérieur à 72,5 % a été évalué de façon préliminaire. Cela s'est traduit par une réduction plus marquée du seuil de cisaillement mais un effet moindre sur la viscosité.

ABSTRACT

The mining industry is enjoying a boom in recent years due to some unique global developments in world metal prices. The high price of metals has encouraged the exploitation of low grade mineral deposits previously untapped due to unfavorable economic conditions. However, the exploitation of low grade mineral deposits is responsible for the production of large quantities of solid, liquid, and gas waste. This large production of waste is due to the fact that for the same amount of useful mineral, low grade ores require the extraction and processing of larger quantities of ore than in the case of high grade deposits. These large quantities of wastes must be managed responsibly. Due to more restrictive environmental requirements, the mining industry is forced to constantly improve its management practices of its wastes. Research undertaken in the mining environment in recent decades has led to the establishment of effective management techniques for reducing or even eliminating some adverse impacts. Thickening techniques were developed in response to the problems of large tailings impoundments and risk of tailings dam failure, and to provide a reduction in the volume of waste. Thickening and filtration techniques aim to increase the percentage of solids in tailings by water recovery using high performance thickeners and filters. Therefore, this technique can improve the hydrogeotechnical characteristics of tailings while allowing extensive recycling of water, which is a real advantage especially in arid or cold weather regions. Thickened tailings can be categorized according to the percentage of solids of densified tailings produced from the thickener; thickened tailings have between 50 wt% and < 70 wt% solids, paste tailings have between 70 wt% and 85 wt% solids, and filtered tailings have a higher percentage of solids, above 85%. Note that paste tailings can be used in cemented paste backfill for underground stopes backfilling.

However, the tailings thickening technique, despite the advantages cited above, faces problems associated with proper transportation by pipeline (especially for thickened tailings and paste) to the place of deposition (filtered tailings are transported by trucks or conveyors). Indeed, densified tailings are considered non-newtonian fluids as opposed to non-densified tailings whose percentage of solids varies from 30 to 45%. The design of a transport system of non-newtonian fluid requires the knowledge of the rheological parameters (yield stress and viscosity) that

ultimately control their flow through a network of pipelines. To optimize the transport of densified tailings (thickened and paste tailings), this study was conducted on two types of tailings from two different mines to determine their rheological properties. The effect of tailings properties and the influence of the addition of certain types of binding agents in different proportions were also studied.

To ensure reliable measurements, a first phase of the project was to validate the experimental procedures using the rotational rheometer AR2000 from TA Instruments. This preliminary stage involved the evaluation of several procedures such as "continuous ramp flow", "steady state step flow" and "stepped flow step " for flow mode tests, and procedures of "frequency sweep" and "stress sweep" for tests in dynamic mode. As part of the validation of experimental procedures, tests were also performed with a ConTec coaxial geometry at Sherbrooke University in order to compare the results. The good agreement between these comparison results at this preliminary stage allowed confirming a good operation of the AR 2000 and thereby validating the measurement procedure.

In the second phase, the measurements were conducted to evaluate the effects of different types of binding agents and their proportions on the rheological properties, as well as the effect of samples age after mixing tailings-binder-water. The results show that the binders tend to increase the rheological parameters by both the fact of their addition to the tailings (the yield stress and viscosity are much higher in the cemented tailings (paste backfill) even at a curing time of 10 min compared to the thickened tailings without binder) and the effect of curing time. Also, a thixotropic behaviour was observed with Doyon mine tailings having 70 wt% solids. The rheological data were correlated with results obtained using simple tools such as mini-cone, small Abrams cone, and V-funnel. The procedure for calculating the flow parameters of non-newtonian fluids in pipelines, including the pressure drop and flow rate, developed by Hallbom (2008) was applied on the mix recipes with Doyon mine tailings at 70 wt% solids. The results show that the unit pressure loss and the transition flow rate increase with the shear yield stress.

The effect of superplasticizers for improving the rheological properties of tailings samples having percentages of solid higher than 72.5 wt% was evaluated. The addition of superplasticizers resulted in a greater reduction in shear yield stress, but had a lesser effect on viscosity.,

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT.....	IX
TABLE DES MATIÈRES	XII
LISTE DES TABLEAUX	XVI
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXVIII
LISTE DES ANNEXES	XXXIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte de l'étude.....	1
1.2 Principaux types de résidus miniers.....	3
1.2.1 Résidus conventionnels	3
1.2.2 Résidus densifiés.....	4
1.2.3 Analogie sols fins et résidus miniers.....	5
1.3 Problématique de l'étude	7
1.4 Objectifs de l'étude	12
1.5 Plan du mémoire	12
CHAPITRE 2 CONCEPTS GÉNÉRAUX SUR LE TRANSPORT DES RÉSIDUS MINIERS ET PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA RHÉOLOGIE DES FLUIDES.....	14
2.1 Concepts généraux sur le transport en charge	14
2.1.1 Théorie et principes physiques de l'écoulement en charge des fluides newtoniens ..	14
2.1.2 Régimes d'écoulement	16

2.1.3	Pertes de charge	17
2.1.4	Principaux modèles d'écoulement des suspensions.....	19
2.1.5	Analyse des modèles spécifiques aux résidus miniers denses et critères d'évaluation de la ségrégation	21
2.2	Principales configurations pour la mise en place de résidus miniers en pâte.....	25
2.2.1	Méthode de gravité et pompage	25
2.2.2	Méthode de pompage et gravité.....	25
2.2.3	Méthode par gravité uniquement	26
2.3	Place de la rhéologie dans le design des systèmes de transport des résidus miniers	27
2.3.1	Approche de Cooke (2001).....	28
2.3.2	Approche de Boger (2002)	29
2.3.3	Approche de Hallbom (2008)	31
2.4	Principes fondamentaux de la rhéologie	33
2.4.1	Définition de la rhéologie et facteurs d'influence des paramètres rhéologiques.....	33
2.4.2	Principaux types de fluides et notion de lois de comportement	34
2.4.3	Détermination des propriétés rhéologiques	40
2.5	État des lieux sur les études relatives à la rhéologie des résidus denses.....	54
2.6	Détermination des paramètres de transport par les approches rhéologiques.....	58
2.6.1	Calcul des pertes de charge.....	59
2.6.2	Calcul de la vitesse d'écoulement	65
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL		68
3.1	Matériaux.....	68
3.1.1	Caractérisation des résidus miniers	68
3.1.2	Description du rhéomètre AR 2000 et de la géométrie de mesure	74
3.1.3	Description du viscosimètre ConTec	76

3.1.4	Description des autres outils de mesure indirecte de paramètres rhéologiques.....	78
3.2	Méthodes et programme expérimental.....	81
3.2.1	Description des différentes méthodes de mesure.....	83
3.2.2	Contrôle de qualité des mesures au rhéomètre	100
3.2.3	Préparation des recettes	103
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES MESURES.....		109
4.1	Résultats des tests de contrôle de qualité	109
4.1.1	Résultats des tests de calibrage avec les fluides standards newtoniens	110
4.1.2	Résultats des tests de calibration avec le fluide standard non-newtonien NNTF1 en mode écoulement.....	112
4.1.3	Résultats des tests de calibration avec le fluide standard non-Newtonien NNTF1 en mode dynamique.....	117
4.1.4	Résultats des tests de validation des procédures de mesure sur des résidus réels à l'aide de rhéomètre AR 2000	120
4.1.5	Comparaison des résultats des tests de AR 2000 et ConTec.....	125
4.1.6	Récapitulatifs	135
4.2	Résultats des mesures rhéologiques sur les recettes de la mine Doyon.....	135
4.2.1	Résultats des essais sur les résidus épaissis.....	136
4.2.2	Résultats des paramètres rhéologiques sur des remblais.....	139
4.3	Résultats des mesures rhéologiques sur les recettes de la mine LaRonde	160
4.3.1	Résultats des essais sur les résidus épaissis.....	160
4.3.2	Résultats des essais sur les remblais laRonde.....	161
4.4	Résultats des tests de fluidité.....	168
4.4.1	Résultats du mini-cône d'écoulement	168
4.4.2	Résultats du petit cône d'Abrams	169

4.4.3	Résultats avec le V-funnel.....	170
4.4.4	Résultats de la caractérisation du ressuage des remblais.....	171
4.4.5	Résultats de la mesure de la résistance mécanique	171
CHAPITRE 5 DISCUSSIONS DES RÉSULTATS		174
5.1	Analyse du comportement thixotropique des remblais	174
5.2	Analyse de l'évolution des paramètres rhéologiques avec le temps (effet de l'âge du remblai).....	177
5.3	Corrélation des résultats rhéologiques et de fluidité.....	181
5.3.1	Corrélation entre seuil de cisaillement et affaissement au mini-cône.....	181
5.3.2	Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement au petit cône d'Abrams.....	185
5.4	Effet du pourcentage de solides sur les propriétés rhéologiques.....	185
5.5	Effet du type de liant et du pourcentage de liant	187
5.6	Effet d'un superplastifiant sur la rhéologie des remblais de la mine Doyon	190
5.7	Détermination de la perte de charge à partir des paramètres rhéologiques sur l'écoulement.....	195
5.8	Comparaison des paramètres rhéologiques des résidus de Doyon et de LaRonde.....	197
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		199
6.1	Recommandations.....	201
6.2	Perspectives	202
BIBLIOGRAPHIE		204
ANNEXES		223

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Caractéristiques géotechniques de différents matériaux (tiré de Li et al., 2002).....	7
Tableau 2.1: Quelques équations de calcul de f en écoulement turbulent.....	18
Tableau 2.2 : Expressions du taux de cisaillement et de H_a pour différents comportements selon les différents auteurs d’après le modèle de Hallbom.....	64
Tableau 2.3 : Reynolds critique Re_c entre le régime laminaire et turbulent selon les auteurs	66
Tableau 3.1 : Teneur en eau et pourcentage solide massique des résidus des mines LaRonde et Doyon.....	69
Tableau 3.2 : Densités relatives des résidus des mines LaRonde et Doyon	71
Tableau 3.3 : Données sur la granulométrie des résidus LaRonde et Doyon	74
Tableau 3.4 : Conditions de mise en œuvre de la procédure de <i>time sweep</i>	89
Tableau 3.5 : Condition de mise en œuvre de la procédure de balayage de contrainte ou de déformation (<i>stress or strain sweep</i>).	90
Tableau 3.6 : Condition de mise en œuvre de la procédure de balayage de fréquence (<i>frequency sweep</i>).....	91
Tableau 3.7 : Composition en oxydes du laitier (Slag) Lafarge.	106
Tableau 3.8 Composition élémentaire du laitier Lafarge	107
Tableau 3.9: Quelques caractéristiques des recettes à base des résidus Doyon.....	107
Tableau 3.10: Quelques caractéristiques des recettes à base des résidus LaRonde	108
Tableau 4.1 : Condition de mise en œuvre du calibrage avec le fluide NNTF 1 en mode écoulement (pour les géométries des plaques parallèles et de du moulinet).....	113
Tableau 4.2 : Conditions d’essais pour le fluide non- newtonien NNTF1 en mode dynamique avec la géométrie des plaques parallèles à stator rugueux et le moulinet.....	118
Tableau 4.3 : Résultats des paramètres rhéologiques du remblai laRonde à 70%S@4,5% de liant CP-SG selon les différents modes opératoires	125

Tableau 4.4: Comparaison des paramètres rhéologiques obtenus par le rhéomètre AR 2000 et le viscosimètre ConTec pour les remblais Doyon à 70 % de solides et 4,5 % de liant à 70% S et 4,5% liant (CP et CP-SG).....	131
Tableau 4.5: Comparaison des paramètres rhéologiques obtenus par le rhéomètre AR 2000 et le viscosimètre ConTec pour les remblais LaRonde à 70 % de solides et 4,5 % de liant à 70% S et 4,5% liant (CP et CP-SG).....	134
Tableau 4.6 : Paramètres rhéologiques des résidus Doyon épaissis à 65%, 70%, 72,5% et 75 % de solides selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	138
Tableau 4.7 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% solides et 2% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	141
Tableau 4.8 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% solides et 2% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	142
Tableau 4.9 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70%S @ 4,5% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	144
Tableau 4.10 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% de solides et de 4,5% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	145
Tableau 4.11 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% de solides et 6% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	149
Tableau 4.12 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% de solides et 6% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	150
Tableau 4.13 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 2% liant (CP et CP-SG) selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	152
Tableau 4.14 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 4,5% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	154

Tableau 4.15 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 4,5% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	155
Tableau 4.16 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 6% liant (CP10 et CP-SG) selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.....	157
Tableau 4.17 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 75% de solides et 6% de liant CP-SG selon les modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.....	159
Tableau 4.18 : Paramètres rhéologiques des résidus LaRonde épaisés à 65%, 70%, 72,5%S et 75% de solides selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	161
Tableau 4.19 : Paramètres rhéologiques du remblai LaRonde à 70%S @ 2% CP et CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	163
Tableau 4.20 : Paramètres rhéologiques du remblai LaRonde à 70%S @ 4,5% liant (CP10 et CP10-SG) selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.....	165
Tableau 4.21 : Paramètres rhéologiques du remblai LaRonde à 70%S @ 6% CP et CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.	167
Tableau 5.1 : Équations et coefficients de corrélation des recettes de résidus Doyon densifiés .	184
Tableau 5.2 : Variation des paramètres rhéologiques selon le modèle de Bingham des recettes pour lesquelles le superplastifiant a été utilisé.	193
Tableau 5.3 : Calcul des pertes de charge de quelques recettes de remblais Doyon	196

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Liens entre les matériaux et quelques caractéristiques géotechniques (tiré de Li et al., 2002)	6
Figure 1.2 : Effet de la teneur en eau massique w sur la résistance en compression uniaxiale (UCS) des remblais miniers (tiré de Benzaazoua et al, 2003).	9
Figure 1.3: Pourcentage des principaux problèmes de transport liés à la technologie de remblayage souterrain dans les mines canadiennes d'après De Souza et Dirige (2003).	10
Figure 2.1 : Représentation schématique de l'écoulement en charge (adapté de Warman Int 2000).	15
Figure 2.2: Régimes et variation du gradient de pression à l'écoulement des résidus selon les modèles d'écoulement en fonction de la vitesse (adapté de Mohamadbeigy, 2005 et de Ulursarlan, 2008).....	21
Figure 2.3 : Mise en évidence de modèle d'écoulement homogène par les méthodes d'Imagerie à Résonance Magnétique (MRI) et la méthode de Vélocimétrie laser à effet Doppler (LDV) (Pullum, 2007).....	22
Figure 2.4: Modèle d'écoulement hybride dû à l'effet de la ségrégation (Pullum, 2007).....	24
Figure 2.5: Méthodes de transport de remblais miniers (adapté de Thomas, 1979; tiré de Belem et al., 2009).....	26
Figure 2.6 : Modes d'opération pour le dépôt des remblais par gravité dans les portions verticales (adapté de Cooke, 2001).	27
Figure 2.7 : Principales étapes à considérer lors de la conception d'un système de transport de remblai minier hydraulique selon Cooke (2001).....	29
Figure 2.8: Procédure de design d'un système de transport des résidus miniers selon Boger (2002).....	30
Figure 2.9: Courbes d'écoulement (rhéogrammes) des principaux comportements rhéologiques de fluides non-newtoniens indépendant du temps.	36
Figure 2.10: Courbes d'écoulement des fluides non-newtoniens dépendants du temps.....	39

Figure 2.11: Géométrie plan/plan (adapté de Baudez, 2001)	43
Figure 2.12: Géométrie de cône et plaque (Labiausse, 2004).....	44
Figure 2.13: Géométrie de cylindres coaxiaux (Baudez, 2001).....	46
Figure 2.14: Viscosimètres capillaires (a- statique et b- extrusion) adapté de Litzenberg, (2004)	47
Figure 2.15: Méthode de mesure du seuil de contrainte avec le test de moulinet (tiré de Boger et al., 2002).....	48
Figure 2.16: Mise en évidence du phénomène de glissement (adapté de Baudez, 2001)	49
Figure 2.17: Profil des vitesses en cisaillement normal et lors d'une fracturation dans l'échantillon (adapté de Baudez, 2001).....	50
Figure 2.18: Phénomène de creusement (d'après Baudez, 2001)	51
Figure 2.19: Schéma synthétique de l'effet des différents phénomènes perturbateurs sur la courbe d'écoulement (d'après Château, 2007)	51
Figure 2.20: Méthode de mesure de l'affaissement (<i>slump</i>) avec le cône standard (ASTM C 143)	52
Figure 2.21: Méthode de mesure du seuil de contrainte par la méthode du plan incliné (Coussot et Boger 1995).....	53
Figure 2.22 : Différents seuils de cisaillement selon la procédure « <i>peak hold</i> » avec la géométrie « <i>vane</i> » (Kwak et al, 2005)	56
Figure 2.23: Modèle d'écoulement homogène de résidus épaissis et en pâte (Warman Int., 2000)	60
Figure 2.24 : Diagramme de calcul de f pour les fluides Binghamiens (Bouzaiene, 1995)	63
Figure 2.25 : Diagramme de conception de l'écoulement des fluides plastiques à seuil de cisaillement proposé par Hallbom (2008).....	65
Figure 2.26 : Comparaison des méthodes de détermination du nombre de Reynolds critique Re_c pour un fluide de Bingham (adapté de Hallbom, 2008).....	67
Figure 3.1: Pycnomètre à hélium AccuPyc 1330 de Micromeritic	71

Figure 3.2 : Spectre de diffraction X des résidus de la mine Doyon.....	72
Figure 3.3 : Spectre de diffraction X des résidus de la mine LaRonde.....	72
Figure 3.4 : Courbes granulométriques cumulées des résidus LaRonde et Doyon.....	73
Figure 3.5 : Différentes dimensions de la géométrie de plaques parallèles (TA Instruments) : influence du gap sur le taux de cisaillement et du diamètre de la plaque sur la contrainte de cisaillement.....	75
Figure 3.6 : Géométrie de moulinet ou « <i>Vane</i> » (TA Instruments)	76
Figure 3.7: Viscosimètre ConTec du laboratoire de béton du l'Université de Sherbrooke	77
Figure 3.8 : Procédure de mesure de l'affaissement (<i>slump test</i>) au petit cône d'Abrams.....	78
Figure 3.9 : Procédure de mesure de l'affaissement à l'aide du mini-cône d'écoulement.....	79
Figure 3.10 : L'outil en entonnoir ou « <i>V-funnel</i> » pour le temps d'écoulement.....	80
Figure 3.11 : Éprouvette de 250 ml pour la mesure du ressuage statique	81
Figure 3.12 : Méthodologie générale.....	82
Figure 3.13 : Principales procédures du mode écoulement	84
Figure 3.14: Procédure de mesure en mode «Up (ascendant) and Down (descendant)».....	85
Figure 3.15 : Différents comportements de fluides soumis à des cisaillements oscillatoires (adapté de Ghezzehei et Or 2001).....	88
Figure 3.16 : Schéma de la procédure du <i>time sweep</i> (TA Instruments).....	89
Figure 3.17 : Procédure de mesure en balayage de contrainte ou de déformation (<i>stress ou strain sweep</i>) (TA Instruments).....	90
Figure 3.18 : Mode de cisaillement dans la procédure oscillatoire de <i>frequency sweep</i> (TA Instruments).....	90
Figure 3.19 : Exemple de résultats sur un échantillon d'encre (adapté de Rheology training course, TA Instruments).....	92

Figure 3.20: Exemple de courbe en mode oscillatoire pour un fluide visco-élastique et forme des ondes suivant le comportement du fluide (adapté de Rheology training course, TA Instruments).....	93
Figure 3.21 : Les différentes étapes de l'essai avec le disque parallèle du rhéomètre AR 2000... 95	
Figure 3.22 : Résultat de la correction sur la contrainte.....	96
Figure 3.23 : Résultats de la correction sur la réduction de nombre de points.....	97
Figure 3.24 : Traitement de lissage et ajustement des courbes d'écoulement en a) selon les modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham et de viscosité b) selon les modèles de Sisko et Cross.....	98
Figure 4.1 : Courbes d'écoulement (à gauche) de viscosité (à droite) du fluide standard newtonien RT 60000 avec les géométries des plaques parallèles rugueuses et du moulinet ou «Vane».....	111
Figure 4.2 : Courbes d'écoulement (à gauche) et de viscosité (à droite) de fluide standard newtonien RT 12500 avec la géométrie de Vane.....	111
Figure 4.3 : Courbe de contrainte de cisaillement-temps pour le fluide NNTF1 avec les géométries du moulinet (Essais Vane 1 et 2) et des plaques parallèles rugueuses.....	112
Figure 4.4 : Comparaison des courbes d'écoulement expérimentales du fluide non-newtonien NNTF1 obtenues avec le stator lisse et rugueux en mode de contrôle en contrainte de cisaillement et en taux de cisaillement selon les procédures du <i>continuous ramp step</i> (CRS), du <i>steady state step</i> (SSS) et du <i>stepped flow step</i> (SFS) et les courbes du fluide de référence.....	115
Figure 4.5 : Comparaison des courbes d'écoulement expérimentales du fluide non-newtonien NNTF1 obtenues avec la géométrie du moulinet en mode de contrôle en contrainte de cisaillement et en taux de cisaillement selon les procédures du <i>continuous ramp step</i> (CRS), du <i>steady state step</i> (SSS), et du <i>stepped flow step</i> (SFS) et les courbes du fluide de référence (Essai 1 avec volume d'échantillon inférieur au volume requis; essai 2 avec volume d'échantillon légèrement supérieur au volume requis).	116

- Figure 4.6 : Résultats des essais dynamiques sur le fluide NNTF1 avec la géométrie des plaques parallèles à stator rugueux et du moulinet selon les procédures de balayage fréquentiel («*frequency sweep*») et de contrainte («*stress sweep*»). 119
- Figure 4.7 : Comparaison des courbes d'écoulement obtenues avec du remblai cimenté fait avec les résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 2 % du liant CP-SG utilisant les stators lisse et rugueux: a) perturbations relevées sur la courbe d'écoulement ascendante avec le stator lisse et b) perturbations avec le stator rugueux. 121
- Figure 4.8: Courbes contrainte-temps obtenues avec la géométrie de plaques parallèles rugueuses à un taux de cisaillement de $0,08 \text{ s}^{-1}$ pour quelques recettes de remblais Doyon avec un pourcentage de solides de 70 % et un pourcentage de liant (CP et CP-SG) de 2 %, 4,5 % et 6 %..... 122
- Figure 4.9 : Application des procédures de mesure sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et avec 4,5 % du liant CP10 seul à 10 minutes d'âge (géométrie des plaques parallèles, stator rugueux). 123
- Figure 4.10 : Application des procédures de mesure sur le remblai Doyon à 70% solide et avec 4,5% 20CP10/80Slag (CP-SG) à 10 minutes d'âge (géométrie des plaques parallèles, stator rugueux). 124
- Figure 4.11: Résultats en mode dynamique (à gauche) et en mode écoulement (à droite) du remblai fait des résidus de la mine LaRonde à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG. . 125
- Figure 4.12A : Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareils sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP10 seul (modèles de Herschell-Bulkley, Casson et Bingham)..... 127
- Figure 4.13A : Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareil sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG (modèles de Herschell-Bulkley, Casson et Bingham). 129
- Figure 4.14: Comparaison des courbes d'écoulement et de viscosité obtenues avec les deux types d'appareils AR 2000 et ConTec sur le remblai Doyon à 70% Solide@4,5% CP aux âges de 10 minutes, 2h et 4h. 133

Figure 4.15: Comparaison des courbes d'écoulement et de viscosité obtenues avec les deux types d'appareils AR 2000 et ConTec sur le remblai Doyon à 70% Solide@4,5% CP-SG aux âges de 10 minutes, 2h et 4h.	133
Figure 4.16: Courbes écoulement et de viscosité de résidus épaissis à 65%, 70, 72,5% et 75% solides.....	136
Figure 4.17: Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 70% solides et 2 % liant (en haut CP10 et en bas CP-SG)	140
Figure 4.18 : Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 70% solide et 4,5 % liant (en haut CP10 et en bas CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, 2h et 4h.	143
Figure 4.19: Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70%solide @4,5%CP aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.	146
Figure 4.20 : Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70 % de solides et 5 % CP-SG aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.....	146
Figure 4.21 : Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70 % de solides et 5 % CP-CV aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.	147
Figure 4.22 : Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70 % de solides et 4,5% CP-FC aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.....	147
Figure 4.23 : Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 70% de solides et 6 % liant (en haut CP10 et en bas CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, 2h et 4h.....	148
Figure 4.24: Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 72,5% de solides et 2 % liant aux âges de 10 minutes, 1h et 2h	151
Figure 4.25 : Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 72,5% de solides et 4,5 % liant aux âges de 10 minutes, 1h, 2h et 4h.	153
Figure 4.26 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais à 72,5% de solides et 6 % liant aux âges de 10 minutes et 2h.....	156
Figure 4.27 : Quelques résultats de remblais de la mine Doyon à 75% de solides et 4,5 et 6%CP-SG avec la géométrie de moulinet aux âges de 10 minutes, et 2h.....	158

Figure 4.28 : Courbes d'écoulement et de viscosité des résidus LaRonde épaissis à 65%S, 70%S, 72,5% et 75% de solides.	160
Figure 4.29 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais laRonde à 70% solide et 2 % liant (CP et CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, et 2h.....	162
Figure 4.30 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais laRonde à 70% solide et 4,5 % liant (CP et CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h et 2h	164
Figure 4.31 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais laRonde à 70% solide et 6% liant (CP et CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, 2h, et 4h.	166
Figure 4.32 : Affaissement au mini-cône de résidus épaissi à 70% S et de remblais miniers à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).	168
Figure 4.33 : Résultats de l'affaissement au petit cône d'Abrams de résidus épaissi à 70% S et de remblais miniers à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).....	169
Figure 4.34 : Temps d'écoulement au «V-Funnel» de résidus épaissi à 70 % de solides et de remblais miniers à 70 % de solides et 4,5 % de liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).....	170
Figure 4.35 : Taux de ressuage de résidus épaissi à 70 % de solides et de remblais miniers à 70 % de solides et 4,5 % de liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).....	171
Figure 4.36 : Résultat de la résistance en compression uniaxiale (UCS) des remblais Doyon et LaRonde ayant des pourcentages de solides de 70% de solides et 4,5% de liant (CP10-CP10-SG).....	172
Figure 4.37: Évolution de l'UCS des recettes de remblais à 70% et 72,5% solide avec 4,5% de liants CP et CP-SG.....	173
Figure 5.1 : Mise en évidence du comportement thixotropique des remblais Doyon à un pourcentage solide de 70% et des proportions de liant CP de 2 %, 4,5% et 6% (représentation en échelle linéaire à gauche et en échelle semi-logarithmique à droite)	175
Figure 5.2 : Mise en évidence du comportement thixotropique des remblais Doyon à un pourcentage solide de 70% et des proportions de liant CP-SG de 2 %, 4,5% et 6% (représentation en échelle linéaire à gauche et en échelle semi-logarithmique à droite)	176

- Figure 5.3 : Évolution de seuil de cisaillement (à gauche) et de la viscosité plastique de Bingham (à droite) en fonction du temps pour les résidus de la mine Doyon épaissis à 70 % de solides et des remblais à 70 % de solides et 4,5 % de liant (CP, CP-SG, CP-FC et CP-CV) obtenus sur le viscosimètre ConTec. 178
- Figure 5.4 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du temps de résidu Doyon épaissi à 70%S et de remblais à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10-SG,) obtenus sur le rhéomètre AR2000. 179
- Figure 5.5 : Évolution de seuil de cisaillement en fonction du temps de résidu Doyon épaissi à 72,5%S et de remblais à 72,5%S et 4,5% liant (CP, CP-SG,) obtenus sur le rhéomètre AR2000. 180
- Figure 5.6 : Corrélation entre seuil de cisaillement et résultats d'ensemble de l'affaissement au mini-cône d'écoulement pour le résidu Doyon épaissi à 70%S et de Remblais Doyon à 70%Set 4,5 % de liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC, et CP10-CV)..... 182
- Figure 5.7 : Corrélation entre seuil de cisaillement et résultats de l'affaissement au mini-cône d'écoulement pour le résidu Doyon épaissi à 70%S et de Remblais Doyon à 70%S@ 4,5% liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC, et CP10-CV). 183
- Figure 5.8 : Corrélation entre l'affaissement au petit cône et le seuil de cisaillement..... 185
- Figure 5.9 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du pourcentage de solides des résidus épaissis 186
- Figure 5.10: Évolution de l'affaissement au petit cône en fonction du pourcentage solide des résidus Doyon épaissis. 187
- Figure 5.11 : Mise en évidence de l'effet des liants sur les paramètres rhéologiques. 188
- Figure 5.12 : Comparaison des courbes d'écoulement du remblai Doyon à 70% solide et 4,5% (CP, CP-SG, CP-CV et CP-FC) à 10 minutes d'âge avec le viscosimètre ConTec 189
- Figure 5.13 : Mise en évidence de l'effet du pourcentage de liant sur les paramètres rhéologiques de remblais Doyon à 70%S et 0%, 2%, 4,5% et 6% liant CP et CP-SG à 10 minutes d'âge. 190

Figure 5.14 : Effet du superplastifiant Glenium 3030NS sur les courbes d'écoulement du remblais Doyon à 75%S @6% CP à 10 minutes et 2h mesuré par le viscosimètre Con Tec.	191
Figure 5.15 : Effet du superplastifiant Glenium 3030NS sur les courbes d'écoulement du remblai Doyon à 75%S et % CP-SG à 10 minutes et 2h mesuré par le viscosimètre Con Tec.....	192
Figure 5.16 : Affaissement au petit cône en fonction du rapport volumique de superplastifiant.	194
Figure 5.17: Comparaison de l'affaissement au petit cône d'Abrams pour le remblai à 75 % de solides et 6 % de 20CP10/80Slag sans super-plastifiant (à gauche) et avec 2 ml /l de SP (à droite).....	194
Figure 5.18: Comparaison des courbes d'écoulement des résidus Doyon et LaRonde épais à 70% Solide et de remblais à 70%S@4,5% liant (CP et CP-SG).....	198

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a_0	Paramètre d'ajustement du modèle de Gawu et Fourie
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Paramètre d'ajustement du modèle de Gawu et Fourie
B	Paramètre de l'équation d'Arrhenius
B_w	Pourcentage de liant dans les remblais
C	Couple de torsion du rhéomètre
C_m	Couple de torsion maximale avec la géométrie du moulinet
CP	Ciment Portland
CSA	Canadian Standards Association
C_U	Coefficient d'uniformité D_{10}/D_{60}
C_v	Concentration solide volumique
C_w	Concentration solide massique
D	Diamètre de la canalisation
D_{10}	Diamètre de particules correspondant à 10% passant
D_{50}	Diamètre de particules correspondant à 50% passant
D_{60}	Diamètre de particules correspondant à 60% passant
D_{90}	Diamètre de particules correspondant à 90% passant
DMA	Drainage Minier Acide
D_r	Densité spécifique de grains solides
e/c	Rapport de la quantité d'eau sur la quantité de liant
f	Coefficient de friction
F	Fréquence

F_R	Force de réaction à l'écoulement
g	Accélération de la gravité
G	Force de gravité
G^*	Coefficient d'élasticité complexe
G'	Module d'élasticité
G''	Module de perte de rigidité
GU	General Use
h	Gap ou ouverture de l'entrefer du rhéomètre
H	Hauteur du cône de mesure de l'affaissement
h_0	Épaisseur du matériau lors de la mesure de seuil de cisaillement sur le plan incliné
Ha	Nombre de stress ou nombre de Hallbom
He	Nombre de Hedström
h_r	Perte de charge totale linéaire (en m)
i	Angle d'inclinaison du plan incliné
J	Perte de charge unitaire
j	Perte de pression unitaire
k	Indice rhéologique du modèle de Hallbom
k_c	Consistance selon le modèle d'ajustement de Cross
k_2	Paramètre de modèle d'estimation du seuil de cisaillement critique
K_C	Consistance selon le modèle de Casson
K_{HB}	Consistance dans le modèle de HerschvHELL Bulkley
K_p	Nombre de Karman
K_S	Consistance selon le modèle d'ajustement de Sisko
L	Longueur de la canalisation

LCH	Laboratoire de Construction Hydraulique
LDV	Laser Doppler Velocimetry
M	Masse de matière
M_{hfin}	Masse humide finale du mélange de remblai
M_{hi}	Masse humide initiale du résidu
MRI	Imagerie à Résonance Magnétique
M_{si}	Masse de résidu sec
M_{th}	Masse totale humide du résidu
M_{ts}	Masse total de solide du résidu.
M_{wai}	Masse d'eau du résidu
M_{waj}	Masse d'eau à ajouter
M_{wt}	Masse d'eau totale du résidu
n	Exposant de taux de cisaillement dans les modèles rhéologiques d'ajustement
N	Nombre total de points échantillonnés lors d'un essai de cisaillement au rhéomètre
NSF	Type de reducteur d'eau (Naptalensulfonate)
P	Pression
Q	Débit volumique
R	Rayon
Re	Nombre de Reynolds
Re_{MR}	Nombre de Reynolds de Metzner et Renner
RMCP	Remblai Minier Cimenté en Pâte
S	Hauteur d'affaissement ou slump
S_1	Section latérale de la canalisation
S_N	Section normale de la canalisation
T	Température dans l'équation d'Arrhenius

UCS	Uniaxial Compressive Strength (résistance à la compression uniaxiale)
USCS	United State Classification of Soils
V_1	Vitesse d'écoulement au point 1
V_2	Vitesse d'écoulement au point 1
V_T	Vitesse critique d'écoulement
w	Teneur en eau massique
W_f	Teneur en eau finale du remblai.
W_i	Teneur en eau initiale du résidu
Z	Ratio de contrainte
z_1	Hauteur

Liste des lettres et symboles grecs

α	Paramètre d'ajustement du modèle de Gawu et Fourie
β	Paramètre d'ajustement du modèle de Gawu et Fourie
ΔP	Variation de pression entre deux points
δ	Angle de déphasage dans un essai dynamique
ε	Rugosité de la conduite
φ	Angle du cône dans la géométrie de mesure du cône et plaque
γ	Taux de déformation
γ_h	Poids volumique
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement
η	Viscosité dynamique

η^*	Viscosité complexe
η_p	Viscosité plastique
η_B	Viscosité plastique de Bingham
η_0	Viscosité au taux de cisaillement nul
η_∞	Viscosité au taux de cisaillement infini
η_m	Viscosité d'un mélange
θ	Angle d'inclinaison de la canalisation
ρ	Masse volumique ρ_m : masse volumique d'un mélange
ρ_l	Masse volumique du liquide
ρ_s	Masse volumique des grains solides
τ_a	Amplitude de la contrainte oscillatoire
τ_{0c}	Seuil de cisaillement critique au-delà duquel survient la ségrégation de particules
τ_0	Seuil de cisaillement
τ_p	Contrainte interparticulaire dans le modèle de Gillies pour le calcul de τ_{0c}
τ_w	Contrainte de cisaillement aux parois de pipeline
Ω	Vitesse angulaire du rhéomètre
ψ	Angle du cône de la géométrie de cône et plaque

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Ajustement des courbes d'écoulement des fluides standards Newtoniens	223
Annexe 2 : Données de référence du fluide NNTF1 fournies par la compagnie de production du fluide de référence PTB	225
Annexe 3 : Feuilles de calcul des ingrédients des recettes de remblais Doyon aux pourcentages solides de 70, 72,5 et 75 %	228
Annexe 4 : Ajustement des courbes d'écoulement et de viscosité de l'ensemble des recettes étudiées.....	233

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte de l'étude

Les ressources minières constituent des sources de revenus participant au développement de l'économie. Au plan mondial actuel, le secteur minier connaît un regain d'activités lié aux cours particulièrement élevés des métaux précieux et de base, et cela rend favorable l'exploitation des gisements même à faible teneur. Le contexte géologique canadien est caractérisé par l'existence de formations géologiques recelant une variété de ressources minérales comprenant des matières utiles telles que l'or, le cuivre, le nickel, le zinc, le lithium, le vanadium et bien d'autres métaux économiquement exploitables. Les opérations d'exploitation de ces différentes ressources comportent des étapes successives allant de la phase d'extraction jusqu'à la phase de traitement avant de disposer de l'élément utile.

L'exploitation minière, à l'instar de toute industrie, produit au cours des différentes étapes, des matières résiduelles solides, liquides et gazeuses. Les rejets miniers solides se répartissent en rejets stériles dépourvus d'éléments utiles récupérables et de rejets du concentrateur produits à la suite du traitement des minerais. Les stériles miniers sont habituellement entreposés en haldes, tandis que les résidus issus de l'usine de traitement du minerai sont traditionnellement acheminés à l'état pulpeux dans les parcs à résidus ceinturés de digues. Ces rejets font l'objet d'attention particulière sur le plan de leur gestion en raison des problèmes potentiels liés à leur entreposage car ils peuvent regorger le plus souvent des substances chimiques nocives pouvant être à l'origine d'impacts environnementaux plus ou moins considérables. La méthode de déposition traditionnelle dans les parcs à résidus peut être problématique. En effet, la réactivité chimique des rejets issus des minerais sulfureux peut engendrer l'oxydation des sulfures en présence d'eau et d'oxygène (Evangelou, 1995, Aubertin et al., 2002a) et entraîner la production de drainage minier acide (DMA) nocifs pour l'environnement. La génération d'acide entraîne comme corollaire, la dissolution des métaux lourds qui peuvent se répandre dans l'écosystème environnant. Les digues construites directement avec des résidus peuvent présenter également

une instabilité physique due à la nature hydro-géotechnique instable des résidus miniers et les fortes pressions hydrostatiques exercées par l'eau et les résidus. On relève plusieurs situations de ruptures de digues à travers le monde avec leur nombre de désastres incluant des pertes en vies humaines occasionnées par ces accidents (Aubertin et al., 2002b).

Face à ces problèmes potentiels ou réels et les exigences législatives davantage restrictives, les récents développements de la technologie et de la recherche proposent diverses options pour prévenir les effets néfastes des rejets miniers en général, et des résidus miniers du concentrateur en particulier. La densification des résidus miniers pour la déposition en surface, proposée par Robinsky, (1975; 1999), s'inscrit en droite ligne de ces techniques. Elle procède à un accroissement des pourcentages solides des résidus avant leur déposition pour garantir un entreposage plus sécuritaire et plus économique. Lorsqu'on augmente le pourcentage de solides des résidus conventionnels sous forme de pulpe, on peut produire des résidus de consistances compatibles avec des techniques de déposition alternatives. Les retombées environnementales que procure la mise en œuvre de la technique englobent le caractère autoportant des résidus denses favorisant ainsi leur déposition sur des terrains inclinés sans construction de grandes digues. On note également une amélioration de leurs propriétés hydro-géotechniques, notamment la capacité de rétention d'eau élevée qui inhibe les réactions d'oxydation. Le recyclage de l'eau récupérée lors de la densification constitue aussi un avantage important dans la mise en œuvre de la technique notamment dans les régions arides ou glaciales. On distingue la déposition en surface des résidus épaissis sans construction de digue (Robinsky, 1999, Jewell et al., 2002), la co-disposition ou mélange de stériles-résidus (Aubertin et al., 2002b; Bussière, 2007) et la déposition souterraine sous forme de remblai minier cimenté en pâte dans le but d'augmenter la résistance mécanique et constituer ainsi un support de terrain (Landriault 1997; Belem et Benzaazoua, 2003, Benzaazoua et Belem 2003, 2004, Kesimal et al., 2004). Le remblai minier qui est produit par ajout de liants hydrauliques réduit également la quantité de rejets à entreposer en surface tout en piégeant les métaux lourds dans les matrices d'hydrates cimentaires qui en sont générés.

Le design du système de transport de ces résidus densifiés dans les sites de dépositions nécessite une bonne connaissance des paramètres rhéologiques, ce qui fera l'objet principal de cette étude. Avant d'en présenter les objectifs et la méthodologie, il convient néanmoins de définir en détail les principaux types de résidus miniers, de préciser la place de la rhéologie dans les procédures de design du système de transport des résidus miniers et les problématiques associées et l'état des lieux sur les études relatives à la rhéologie des résidus miniers..

1.2 Principaux types de résidus miniers

En se basant sur le pourcentage solide des résidus, on peut classer les résidus selon plusieurs catégories décrites dans la section suivante.

1.2.1 Résidus conventionnels

On qualifie les résidus de conventionnels ou traditionnels, lorsqu'ils se présentent à l'état pulpeux sursaturé en eau tel que produit à l'usine de traitement. Les résidus conventionnels forment généralement une boue peu consistante qui s'écoule assez facilement. Ils correspondent au terme général «*slurry*» en anglais. Le pourcentage de solides massique (C_w) typique de ces résidus est compris entre 25 et 45% selon Bussière (2007) ou la concentration solide volumique (C_v) est inférieure à 40% selon Pullum (2007). Cela correspond à de teneurs en eau massiques supérieures à 300 % et 122 %. Les résidus conventionnels provenant du concentrateur sont constitués de roches broyées non utiles et d'eau de procédé après circulation dans les cellules de flottation. La taille des particules, à leur sortie de l'usine, est de l'ordre de la maille de libération des minerais en question. Dans les résidus de roches dures, leurs diamètres D_{10} (diamètre de particules correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique) sont compris le plus souvent entre 1 μm et 4 μm et leurs diamètres D_{60} (diamètre de particules correspondant à 60% des particules passant) varient entre 10 μm et 50 μm , ce qui donne un coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) situé entre 8 et 18 (Bussière, 2007). En général, 70 à 97 % des grains ont un diamètre inférieur à

80 μm (Bussière, 2007). Cette distribution granulométrique a été observée par d'autres auteurs tels Vick (1990), Aubertin *et al.* (2002a), Benzaazoua *et al.*, (2003). Cela permet de les classer comme des silts sableux non plastiques (ML) selon la classification USCS (McCarthy, 2007). Leur transport se fait par pipeline équipé de pompes centrifuges.

1.2.2 Résidus densifiés

Comme déjà mentionné, les résidus densifiés peuvent être classés, selon le pourcentage de solides massique, comme des résidus épaissis, des résidus en pâte (incluant les remblais miniers en pâte cimenté), ainsi que les résidus filtrés.

Les résidus épaissis ont un pourcentage de solides massique compris entre 50 et 70 % (Robinsky, 1999; Sofra et Boger, 2002). Ils résultent d'une filtration modérée des résidus conventionnels par usage d'équipements d'épaississement et de filtration. Leur transport se fait par pipeline équipé de pompes centrifuges.

Lorsque le niveau de filtration est plus élevé en utilisant une série d'équipements incluant des filtres sous vide ou à presse, des épaisseurs à cyclones et des mélangeurs, on obtient à la sortie un pourcentage solide élevé de l'ordre de 70 à 85 %. Les résidus sont alors dans un état pâteux. Ils sont donc plus consistants et leur maniabilité est plus difficile. En raison de leurs propriétés rhéologiques et les fortes pertes de charge générées lors du transport dans les pipelines, ces types de résidus ne peuvent être transportés en pipeline que par l'usage de pompes plus performantes, en occurrence les pompes à déplacement positif.

Les remblais miniers en pâte sont des matériaux obtenus par le conditionnement particulier des résidus du concentrateur dans le but de remplir les chantiers déjà exploités et de constituer un support de terrain secondaire pour assurer la stabilité des ouvrages miniers souterrains et la sécurité des travailleurs miniers. Le remblai minier cimenté en pâte (RMCP) est un matériau

confectionné à partir d'un mélange composé de trois ingrédients : les résidus de concentrateurs tout venant encore humides filtrés ou en pâte (pourcentage solide de 70 à 85 % selon la granulométrie et la densité) dans lesquels sont additionnés un liant hydraulique (ciments portland, laitier, pouzzolanes, etc.) à des proportions comprises entre 2 % et 7 % et une certaine quantité d'eau pour assurer le gâchage et le malaxage du mélange et assurer le taux d'affaissement désiré (Benzaazoua et Belem 2003, Belem et Benzaazoua 2008). En général, une des exigences fondamentales auxquelles le mélange de remblai en pâte doit «absolument» répondre du moins empiriquement, est qu'au moins 15 % en masse de la concentration solide doivent être constitués de particules de taille inférieure à 20 μm (Landriault, 1995). Cela a pour effet de retenir suffisamment d'eau, de le maintenir sous forme de pâte et de faciliter son transport (Landriault, 1995). Cette capacité de rétention d'eau intervient également dans le durcissement et le gain de résistance progressif de la phase cimentaire. La proportion des principaux ingrédients du remblai est choisie en fonction des objectifs de sa mise en place. Cette technique présente des avantages au plan environnemental par la réduction de la quantité de résidus à entreposer en surface car elle permet d'éliminer une grande partie de rejets jusqu'à 60% (Belem et al., 2009).

Les résidus filtrés sont des résidus miniers qui ont atteint des niveaux de retrait d'eau très élevés induisant une concentration en particules solides supérieure ou égale à 85 %. Les résidus dans cet état sont presque secs, ce qui leur donne l'aspect d'un matériau granulaire compressé appelé en anglais « *filter cake* ». Leur transport ne peut se faire par pipeline, mais requiert des systèmes de convoyeurs à bandes ou de camion ou train (Gowan et Williams, 2002).

1.2.3 Analogie sols fins et résidus miniers

Du point de vue géotechnique, les mélanges de particules solides d'un sol et d'un liquide peuvent être abordés selon leur contenu en eau qui détermine leur aptitude à l'écoulement comme présenté dans la Figure 1.1. Aux deux extrémités, on a respectivement les poudres constituées uniquement de grains solides et l'eau dépourvue d'éléments solides. Les phases intermédiaires sont formées des sols, des pâtes et des boues qui sont obtenus par une addition progressive d'eau.

Les propriétés qui sont considérées lorsqu'on s'intéresse à l'un ou l'autre de ces matériaux ne sont pas identiques. Ainsi pour les sols, on s'intéresse à la résistance au cisaillement ou sa capacité portante dans le cadre de son utilisation pour supporter une fondation. Lorsque le matériau est à l'état de pâte saturée en eau, son comportement au cisaillement simple et ses paramètres rhéologiques constituent les données déterminantes pour son transport. Pour ce qui concerne les boues qui sont plutôt sursaturées en eau, les paramètres rhéologiques et la ségrégation des particules constituent les préoccupations relatives à leur transport. Évoquant l'état des connaissances pour chaque matériau, Li et al., (2002) estimaient que l'écoulement visqueux des matériaux granulaires était le moins bien compris, ce qui appelle à davantage de recherches dans ce domaine.

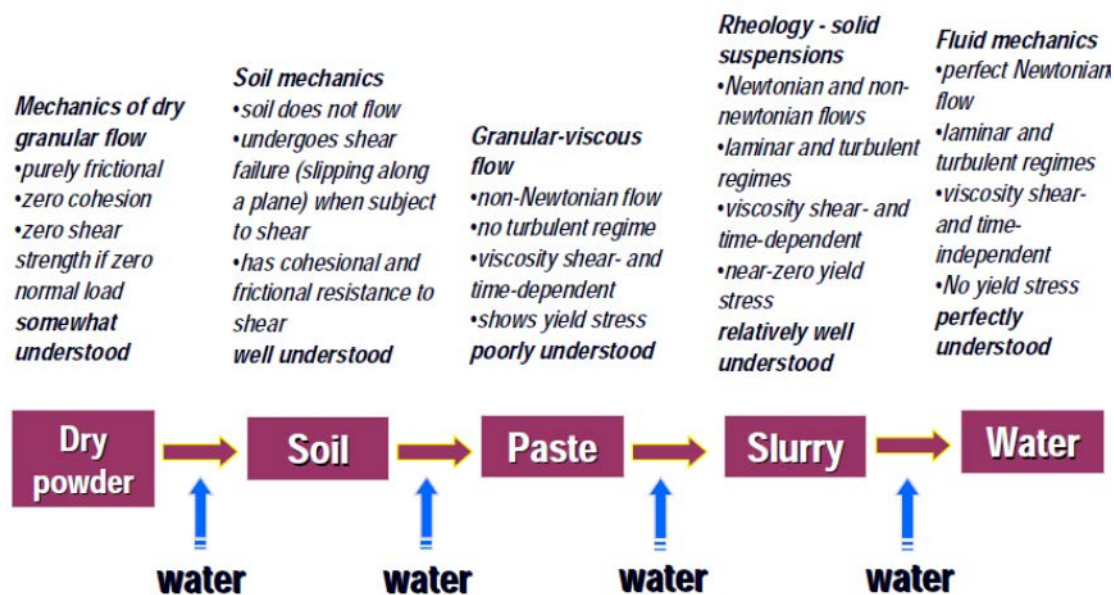





Figure 1.1: Liens entre les matériaux et quelques caractéristiques géotechniques (tiré de Li et al., 2002)

Le Tableau 1.1 résume les ordres de grandeurs des différents paramètres pour chaque type de matériau. Si les sols ne peuvent pas s'écouler à cause de leur résistance au cisaillement élevée (comprise entre 10 et 100 kPa), les pâtes et les boues peuvent s'écouler avec des comportements différents déterminés par leurs paramètres rhéologiques, notamment le seuil de cisaillement (τ_0) qui est respectivement compris entre 0,1 à 1 kPa pour les pâtes et presque inexistant pour les

boues diluées. Cela implique des frottements plus accentués lors de l'écoulement des pâtes que celui des boues, rendant ainsi leur écoulement plus complexe et moins bien maîtrisé que les autres matériaux comme précisé sur Figure 1.1. En se référant à cette approche géotechnique, les résidus miniers conventionnels ont donc des propriétés semblables à celles des boues.

Tableau 1.1: Caractéristiques géotechniques de différents matériaux (tiré de Li et al., 2002).

	Soil 	Paste 	Dilute Slurry 
Particle arrangement	in contact	← essentially in contact	separated
Matrix pressure	anisotropic $P_{total} \gg P_{porewater}$? $P_{total} > P_{porewater}?$	isotropic $P_{total} = P_{porewater}$
Shear-yield behaviour when $\sigma_n = 0$	no flow slip along shear plane $\tau_Y = c_u = 10-100$ kPa	← non-newtonian (plug) slip plane? $\tau_Y = 0.1-1$ kPa	→ newtonian to non-newtonian $\tau_Y \approx 0$ kPa
Shear resistance when $\sigma_n \neq 0$	frictional resist. $\propto \sigma_n$ no viscous resistance	frictional resistance? viscous resist. $\propto \gamma$	no frictional resist. viscous resist. $\propto \gamma$
Packing density	low (fines not necessary)	← high (require fines)	lower (fines not necessary)
Saturation	← unsaturated	saturated	→ oversaturated

1.3 Problématique de l'étude

Les résidus miniers densifiés présentent un comportement particulier en raison de la nature et du pourcentage de leurs constituants (pourcentage de solides élevé) et dont l'appréhension n'est pas triviale. Pourtant, la connaissance des propriétés rhéologiques des résidus miniers densifiés est importante non seulement pour les besoins de design d'un système de transport hydraulique en charge des résidus miniers pour leur mise en place sous terre ou en surface, mais aussi pour le choix des épaisseurs en amont (Jewell et Fourie, 2002).

Beaucoup d'auteurs leur attribuent un comportement pseudo-plastique de type Bingham (Eberl et Eberl, 1995; Gillies et al., 2007; Huynh, 2006) tandis que d'autres évoquent leur caractère rhéofluidifiant ou rhéodilatant avec seuil où même un comportement dépendant du temps a été mentionné (Jewell et al., 2002). Ainsi, des tests préliminaires réalisés par Diouf (2005) sur des remblais en pâte à l'aide du rhéomètre AR2000 équipé de la géométrie de plaques parallèles ont conduit à des comportements d'écoulement inattendus, probablement associés à des biais dans les mesures et imputables aux phénomènes de glissement, de la fracturation, du creusement, et de la migration etc. Les travaux publiés dans la littérature semblent indiquer que ces comportements ne sont pas inhérents à la nature des matériaux testés (Coussot et Ancey, 1989; Baudez, 2001; Huynh et al., 2006). Pourtant, la géométrie de plaques parallèles présente des avantages pour certaines utilisations, notamment son aptitude à permettre des études comparatives selon une même plage de taux de cisaillement, surtout lorsqu'on désire tester l'effet du temps sur le comportement rhéologique d'un matériau donné. Ainsi Baudez (2001) a eu recours à cette géométrie pour évaluer l'effet du temps de stockage des boues résiduaires de traitement d'eau pour leur utilisation dans l'épandage agricole. La détermination d'une méthodologie fiable par la validation des procédures rhéométriques débarrassées de toute perturbation pour l'étude des paramètres rhéologiques de ces matériaux densifiés est alors une exigence préalable pour leur utilisation dans une perspective d'acquisition de données reproductibles pour une optimisation des conditions de leur transport.

À la lumière des études antérieures réalisées sur le sujet, il ressort par ailleurs que la rhéologie des résidus est contrôlée par un nombre de variables telles que la distribution granulométrique des particules, la chimie de la surface des particules, la viscosité du liquide, la quantité et les caractéristiques de flocculant, la concentration des particules et la quantité d'énergie de malaxage (Huynh et al., 2006; Meggyes, 2006). De ce point de vue, la maîtrise de l'influence des différents constituants selon leur pourcentage dans le mélange peut constituer une donnée permettant de prédire leur comportement d'écoulement et d'optimiser leur condition de transport, ce qui constitue un défi pour les utilisateurs de ces matériaux. Dans cette perspective, il est essentiel d'élucider le comportement rhéologique de ces résidus denses, car les propriétés rhéologiques entrent dans les calculs des paramètres de transport tels que les pressions de pompage (ΔP), les pertes de pression unitaires ($\Delta P/L$), et le débit de déposition (Q) de ces matériaux.

Pour la mise en place des matériaux cimentaires comme le béton et le remblai sous terre, le défi est de transporter ces matériaux à des distances souvent considérables sans en altérer notablement leurs propriétés lors du parcours qui peut avoir une influence sur leur résistance mécanique (Kaplan, 2001). Dans le cas de remblais miniers en pâte cimentés, le rapport eau /ciment influence la résistance mécanique du remblai minier (Benzaazoua et al., 2004). La Figure 1.2 montre l'évolution de la résistance en compression uniaxiale (*uniaxial compressive strength* UCS) des remblais minier cimentés en pâte (RMCP) en fonction de la teneur en eau massique. La résistance connaît alors une diminution linéaire à tous les âges avec l'augmentation de la proportion d'eau de mélange. La pratique courante d'ajout d'eau supplémentaire à une recette donnée de remblai, dans le but de respecter l'affaissement ou le *slump* compatible avec le transport, peut alors être préjudiciable pour le gain de résistance mécanique.

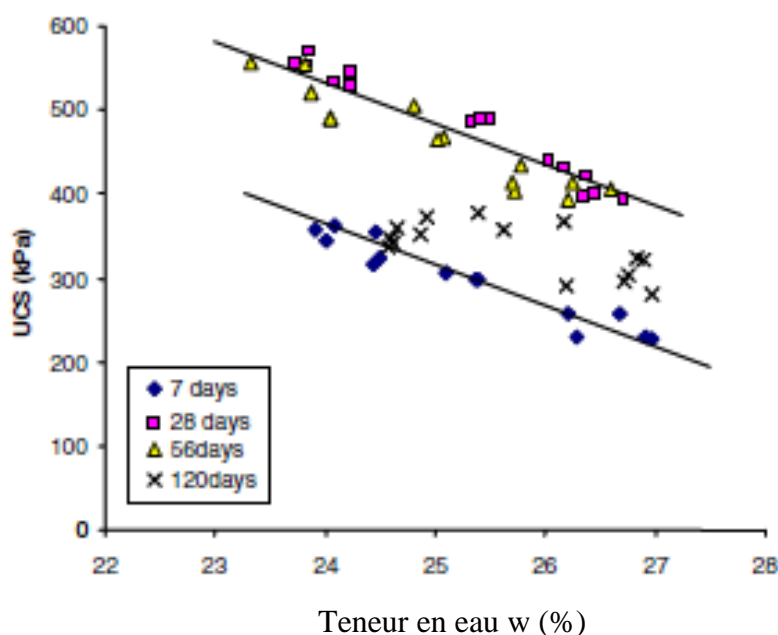


Figure 1.2 : Effet de la teneur en eau massique w sur la résistance en compression uniaxiale (UCS) des remblais miniers (tiré de Benzaazoua et al, 2003).

Malgré les avancées réelles réalisées dans la technologie de remblayage minier, quelques problèmes opérationnels liés à la conception des systèmes de distribution par pipeline de ces matériaux subsistent encore (Cooke, 2001). Dans le cas du dépôt de surface, les résidus ne

doivent pas être trop consistant, ce qui empêchera leur écoulement et entraînera une accumulation en un seul point. Il doit par contre être en mesure de s'écouler sur une distance raisonnable selon un angle de déposition acceptable, sans pour autant être trop fluide, et s'écouler sur une grande distance (Sofra et Boger, 2002; Kwak et al., 2005).

La Figure 1.3 présente les principaux problèmes de transport liés à la technologie de remblayage souterrain dans les mines canadiennes d'après (De Souza et Dirige 2003). Il ressort que les situations de bouchon de pipelines et des trous de forage enregistrées sur les installations de remblayage sont les plus courantes avec un pourcentage de 35 % de l'ensemble des problèmes inhérents à la technologie de remblayage, soit 65 % des problèmes spécifiques au transport (De Souza et Dirige 2003). Les autres problèmes relevés dans le domaine du transport au cours de cette étude sont relatifs à l'éclatement des pipelines, et les chocs exercés sur ces derniers. Ces situations sont rencontrées à des pourcentages respectifs de 12 % et 8,5 %.

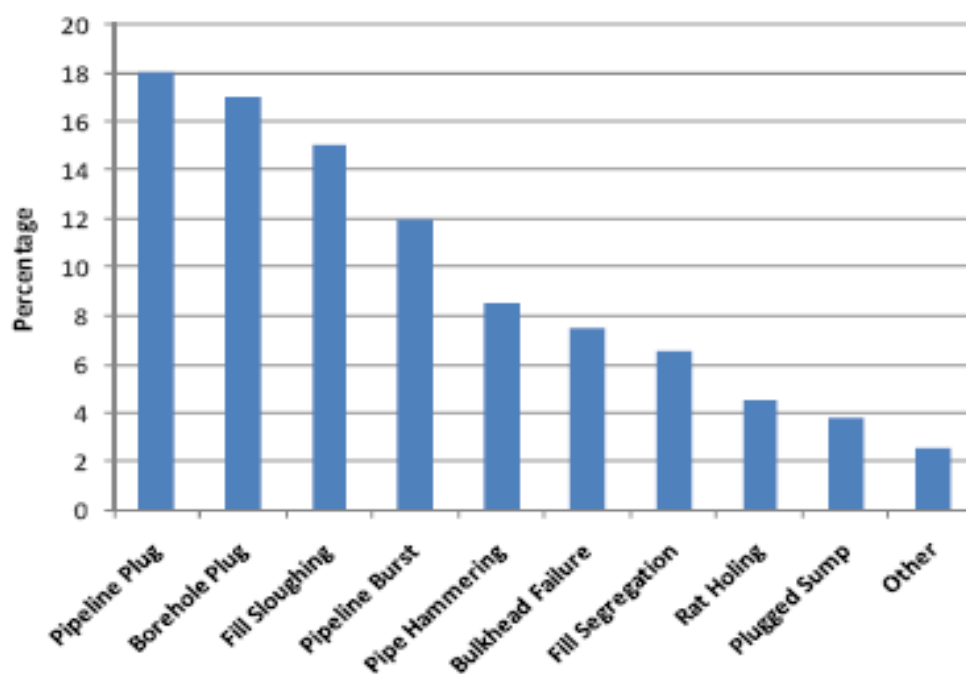


Figure 1.3: Pourcentage des principaux problèmes de transport liés à la technologie de remblayage souterrain dans les mines canadiennes d'après De Souza et Dirige (2003).

Le recours à un test d'écoulement en boucle (*loop test*) pour évaluer les paramètres de transport semble systématique. Cependant, dans de nombreux cas, les données acquises au cours de cette opération se révèlent non entièrement conformes aux données recueillies à l'échelle réelle lors de la production (Clark et Vikery, 1995; Li et al., 2002).

Pour ce qui concerne le volet économique de la question, Paterson et al., (2004) et Cooke (2009) indiquent que les coûts à supporter pour le transport en pipeline des résidus sont fortement fonction de la concentration solide visée des résidus. Toute augmentation de ce paramètre s'accompagne d'une augmentation des coûts au niveau des aspects suivants relatifs aux processus de préparation et de pompage:

- L'exigence d'équipements plus performants pour la préparation des résidus pour obtenir la consistance visqueuse voulue des matériaux;
- Le design hydraulique du système de distribution compte tenue de la variabilité des propriétés rhéologiques : cela entraîne des calculs plus complexes et la phase de design revient plus dispendieuse;
- Le design mécanique des éléments du système de distribution (tuyaux) à cause des pressions d'opération : les fortes pressions vont exiger des caractéristiques plus résistantes pour les conduites, donc plus chères à confectionner;
- Les critères de sélection entre les pompes centrifuges et à déplacement positif : lorsque les concentrations sont élevées les simples pompes centrifuges ne peuvent plus assurer le transport des résidus. Il faut alors avoir recours aux pompes à déplacement positif bien entendu plus chères à l'acquisition.

Ainsi, Paterson et al., (2004) et Cooke (2009) conseillent de mener une analyse de cycle de vie de plusieurs options avant d'établir un système de distribution définitif.

1.4 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer les propriétés rhéologiques des résidus densifiés à l'aide de rhéomètres d'une part et en utilisant des outils simples de mesure d'autre part, afin de saisir les influences qu'engendrent les interactions complexes qui peuvent exister entre les différents composants sur les paramètres rhéologiques. Les objectifs spécifiques associés à cet objectif général portent sur :

- Le développement ou la validation de procédures de mesure des paramètres rhéologiques compatibles avec la nature des résidus miniers densifiés. Cet objectif spécifique passe par la validation du bon fonctionnement du rhéomètre à travers la mise en œuvre de procédures de mesure avec des fluides standards newtoniens et non newtoniens avant leur application à des résidus miniers densifiés.
- Identifier les principaux facteurs qui ont un impact sur les propriétés et sur lesquels on peut influencer ou optimiser pour améliorer le transport des résidus denses. Ces facteurs incluent la teneur en eau, le type et pourcentage de liant (effet des ajouts minéraux), et le temps de cure (dans le cas de mélanges avec liant).
- Explorer les possibilités de corrélation des résultats obtenus de mesures directes à l'aide d'outils simples existants et les résultats issus des mesures rhéologiques.

1.5 Plan du mémoire

Le présent mémoire présente dans un premier temps (chapitre 2) les concepts généraux inhérents à la discipline de la rhéologie et associés aux écoulements de matériaux fluides en charge avant de mettre l'accent sur les cas spécifiques des matériaux mixtes solide-liquide qui constituent les résidus miniers. Les grandes démarches de la mise en place d'un système de transport seront exposées à travers ses étapes indispensables. Ensuite, la démarche méthodologique et le programme expérimental sont exposés avec la description détaillée des matériaux, appareils et outils utilisés dans le cadre de l'étude (chapitre. 3). Le chapitre 4 est consacré à la présentation

des résultats auxquels le programme expérimental a permis d'aboutir. Ces résultats concernent d'abord le calibrage du rhéomètre de mesure par l'usage de fluides standards newtoniens et non-newtonien. Les résultats des tests rhéologiques réalisés à l'aide de deux rhéomètres différents sur des échantillons de résidus réels pour la validation des méthodes font suite aux résultats du calibrage. Les résultats de l'ensemble des tests réalisés sur les résidus font l'objet de la deuxième partie du chapitre 4. Le chapitre 5 est consacré à une discussion des résultats obtenus au cours de l'étude à travers des explications de ces derniers, tout en les confrontant à des résultats d'autres auteurs afin de proposer des recommandations. Ainsi un point de la discussion est consacré aux résultats de l'étude de l'effet d'un superplastifiant sur les paramètres rhéologiques.

CHAPITRE 2 CONCEPTS GÉNÉRAUX SUR LE TRANSPORT DES RÉSIDUS MINIERS ET PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA RHÉOLOGIE DES FLUIDES

2.1 Concepts généraux sur le transport en charge

La maîtrise des techniques de transport de matériaux sous charge a constitué pendant longtemps un des problèmes fondamentaux, notamment pour la distribution de l'eau. Les théories et principes physiques se sont donc développés à l'origine autour du transport de l'eau pour ensuite s'étendre vers d'autres types de matériaux dont les résidus miniers. En effet, les préoccupations relatives à l'installation d'une adduction d'eau pour l'alimentation en eau potable, ou le pompage par pipeline des résidus miniers vers les parcs à résidus, sont assez similaires. Dans ces deux cas, on vise à déterminer les pertes de charges qui seront engendrées dans les canalisations entre le point de départ jusqu'au lieu final d'utilisation. Ces théories et principes de base seront abordés dans un premier temps avant de faire ressortir les spécificités associées aux résidus miniers.

2.1.1 Théorie et principes physiques de l'écoulement en charge des fluides newtoniens

Le transport d'une matière fluide suppose le déplacement ou l'écoulement de celle-ci d'un point à un autre. Les principales théories de base expliquant ces déplacements de matières fluides portent sur les rapports de masses, d'énergie et de la quantité de mouvement lors du déplacement d'un élément de matière. Dans un écoulement permanent ou stationnaire d'un fluide incompressible caractérisé par la constance des paramètres induisant l'écoulement (température, pression, vitesse et densité), la masse de fluide qui passe à un point donné est identique à la masse de fluide qui traverse la section à un autre point de la canalisation. Cela traduit le principe de la conservation du débit. L'énergie interne du système est exprimée par l'équation de Bernoulli formulée comme suit (Warman Int., 2000) dans un cas d'écoulement en charge tel que présenté à la Figure 2.1.

$$\frac{p_1}{\gamma_h} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma_h} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \text{constante} \quad (2.1)$$

Dans cette équation, p_1 , p_2 , sont les pressions respectivement aux points 1 et 2, z_1 et z_2 les côtes mesurées respectivement aux points 1 et 2; γ_h le poids volumique du fluide ($\gamma_h = \rho \times g$ avec ρ la masse volumique du fluide et g la constante de gravitation universelle).

Le terme $\frac{p_1}{\gamma_h}$ correspond à la charge de pression due à l'énergie de pression;

$\frac{V_1^2}{2g}$ correspond à la charge de vitesse due à l'énergie cinétique;

z_1 et z_2 sont les hauteurs des points et correspondent à la charge de position.

Par contre, lorsqu'on prend en compte la viscosité du fluide due aux frottements des particules fluides d'une part entre elles et d'autre part avec les parois de la canalisation, l'équation de Bernoulli prend la forme suivante Warman Int., (2000).

$$\frac{p_1}{\gamma_h} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma_h} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_r \quad (2.2)$$

où h_r est la perte de charge entre le point 1 et le point 2.

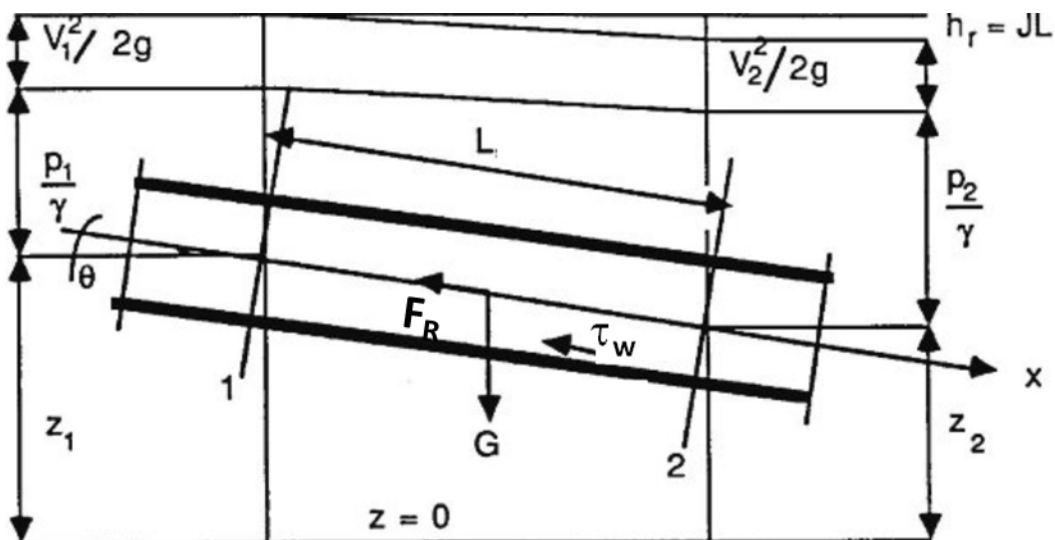


Figure 2.1 : Représentation schématique de l'écoulement en charge (adapté de Warman Int 2000).

2.1.2 Régimes d'écoulement

L'écoulement d'un fluide incompressible le long d'une canalisation peut se faire selon différents régimes d'écoulement qui dépendent de la viscosité dynamique du fluide, de la vitesse d'opération et du diamètre de la canalisation. Le régime d'écoulement traduit le comportement des différentes couches fluides par rapport aux autres filets du liquide. On utilise le nombre de Reynolds (R_e) pour définir la limite du passage d'un régime à un autre, en fonction de la vitesse d'écoulement qui contrôle le comportement des couches de fluide. C'est un nombre adimensionnel obtenu par le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Sa relation mathématique d'après Wilson et al., (2006) revient à :

$$R_e = \frac{\rho V D}{\eta} \quad (2.3)$$

où D est le diamètre de la canalisation en mètre (m), η est la viscosité dynamique du fluide en pascal-seconde (Pa.s), V est la vitesse d'écoulement du fluide en mètre (m/s) et ρ la masse volumique du fluide en Kg/m^3 .

À partir de la valeur de R_e , on distingue deux principaux types de régimes : le régime laminaire et le régime turbulent. Le régime est dit laminaire lorsque la vitesse d'écoulement est telle que les filets imaginaires constituant le fluide glissent les uns sur les autres sans s'entremêler. Tout se passe comme si les filets fluides se déplaçaient en ligne droite en glissant les uns sur les autres. Dans le cas de l'eau, ce régime apparaît lorsque le nombre de Reynold est inférieur à 2000 dans lequel cas les forces de viscosité sont supérieures aux forces d'inertie. Le régime turbulent est constaté lorsque les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité entraînant un enchevêtrement des couches fluides entre elles. Le nombre de Reynolds est alors supérieur à la valeur de 2000 (pour l'eau). Pour l'écoulement des résidus miniers, Bouzaiene (1995) indique que les régimes laminaire et turbulent sont observés pour des valeurs de R_e respectivement inférieures à 2100 et supérieures à 4100. Lorsque R_e est compris entre ces deux valeurs, le régime est de transition.

2.1.3 Pertes de charge

La perte de charge correspond à la dissipation d'énergie due aux forces de frottement internes et se traduit par une élévation de température. Cette dissipation provoque une réduction de l'énergie mécanique initiale disponible. Dans les problèmes hydrauliques, cela revient à déterminer la proportion de l'énergie mécanique qui contribue à cette perte afin de déterminer la charge initiale nécessaire pour acheminer le fluide tout le long de son parcours. Elle est représentée dans l'équation 2.2 par le terme h_r . Pour permettre un transport approprié, il faut disposer d'une «charge suffisante» de départ pouvant être fournie par une énergie de gravité ou de pompage. Le plus souvent, il est assumé que cette perte de charge est linéaire c'est-à-dire proportionnelle à la distance de tuyau selon une loi de la forme:

$$h_r = J \times L \quad (2.4)$$

où h_r est la perte de charge linéaire totale (en m de fluide), J est la perte de charge par unité de longueur (m de fluide/m de pipeline), et L est la longueur totale de la conduite (en m).

La perte de charge unitaire J est reliée au coefficient intrinsèque de friction f que possède chaque fluide par l'expression générale (2.5) pour tout écoulement sous charge, connue sous le nom de l'équation de Darcy-Weisbach qui s'écrit :

$$J = \frac{h_r}{L} = f \frac{V^2}{2gD} \quad (2.5)$$

Le coefficient f dépend principalement du nombre de Reynolds Re et des caractéristiques géométriques de la canalisation à savoir le diamètre (D) et la rugosité (k ou ε).

La perte de charge peut être exprimée sous forme de réduction de pression en fonction de la distance appelée perte de pression exprimée en Pa (ou kPa). Dans ce cas, la perte de pression

unitaire (j) est alors obtenue en multipliant la charge hydraulique par le poids volumique du fluide. j est obtenu à partir de J par l'équation 2.6.

$$j = \rho g J = f \frac{\rho V^2}{2D} \quad (2.6)$$

Pour un fluide newtonien en écoulement laminaire ($R_e < 2000$), f est donné par la relation suivante: $f = \frac{16}{R_e}$. Il suffit de remplacer la valeur de f dans l'équation 2.6 pour obtenir les pertes de charge unitaire J pour une vitesse et un diamètre de pipeline donnés. Pour les écoulements en régime turbulent c'est-à-dire $R_e > 4000$, f peut être calculé directement ou itérativement par les équations du Tableau 2.1. Le coefficient de friction f pour le cas de l'eau et de manière générale, peut être déterminé à l'aide du diagramme de Moody pour les deux types de régime ainsi que pour le régime transitoire compris entre 2000 et 4000, connaissant la valeur du nombre de Reynolds et la rugosité du tuyau.

Tableau 2.1: Quelques équations de calcul de f en écoulement turbulent

Auteurs de la méthode de calcul	Facteur de friction f	Types de méthodes
Colebrooke et White (1939)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{2,51}{R_e \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3,7D} \right]$	Méthode itérative
Churchill (1977)	$f = \frac{2}{\left[2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{R_e} \right)^{0,9} + 0,27 \varepsilon / D} \right) \right]^2}$	Méthode directe
Méthode directe de Zigrang et Sylvester (1982)	$f = \frac{2}{25,92 \left[\log_{10} \left(\frac{6,9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right) \right]^2}$ $f = \frac{2}{32 \left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} - \frac{4,518}{R_e} \log_{10} \left(\frac{6,9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right) \right) \right]^2}$	Méthode directe

2.1.4 Principaux modèles d'écoulement des suspensions

L'écoulement des suspensions en pipeline a été étudié dans le but de comprendre les comportements et la distribution des matériaux sur la section de la canalisation (Wilson, 1976, Gillies et al., 1991; Matousèk, 2005). Le comportement à l'écoulement de ces matériaux est étroitement associé au régime entretenu, donc à la vitesse de fonctionnement du système et à la concentration et aux caractéristiques de la phase solide. Toute augmentation ou toute diminution de ces facteurs jusqu'à un certain seuil induit un changement de régime et un nouveau comportement par rapport à la ségrégation des particules.

Des études ont permis de dégager conceptuellement quatre modèles décrivant la distribution transversale des particules solides dans la section transversale du tuyau au cours de l'écoulement horizontal et cela en fonction des vitesses d'opération ou régime d'écoulement. Il s'agit des modèles d'écoulement à lit granulaire stationnaire, écoulement à lit granulaire mobile, écoulement en suspension ou partiellement stratifié, et l'écoulement homogène ou pseudo homogène ou totalement en suspension. Les zones d'apparition de ces quatre régimes en fonction de l'augmentation de la vitesse et du gradient de pression sont présentées schématiquement à la Figure 2.2.

Le modèle d'écoulement à lit granulaire stationnaire est le modèle d'écoulement en bi-couche de Wilson (1976) ou écoulement asymétrique ou encore totalement stratifié dans lequel la quasi-totalité des particules reposent au fond en contact entre elles pour participer à la formation du lit granulaire stationnaire ou glissant, tandis que la partie supérieure est nettement plus fluide. Ce modèle concerne des mélanges formés de particules grossières opérés à un régime laminaire.

Le modèle d'écoulement à lit granulaire mobile correspond à l'écoulement alternatif ou mixte partiellement stratifié ou partiellement en suspension, dans lequel cas seulement une partie des particules participe à la formation du lit granulaire tandis que le reste est en suspension ou présente des contacts sporadiques avec le lit de fond. Ce dernier modèle peut être subdivisé en

plusieurs variantes dont chacune constitue un modèle. Ce type de modèle est aussi relié à la large distribution granulométrique de la phase solide.

Le modèle d'écoulement hétérogène ou en suspension est lié à une vitesse d'écoulement relativement élevée entretenue dans le pipeline mais inférieure à la vitesse de l'écoulement pseudohomogène. Une partie des particules du fond est charriée de manière constante de sorte que l'épaisseur du lit granulaire est assez faible. Le régime hétérogène selon l'approche de Wilson (1976) englobe le modèle bicouche et le modèle tri-couche.

Le modèle homogène ou pseudo homogène est constaté suite à une élévation importante de la vitesse d'écoulement. Cela entraîne la mise en mouvement de tous les constituants solides de la suspension excluant toute ségrégation. Les mélanges constitués d'une grande concentration solide de particules fines (inférieur à $75\mu\text{m}$) s'écoulent principalement selon ce modèle. La Figure 2.2 indique l'évolution du régime depuis le stade de vitesse (V_1) très faible ne permettant aucun mouvement des particules solides régime d'écoulement à lit stationnaire jusqu'à la vitesse (V_4) suffisamment élevée pour mettre toutes les particules solides dans un état de mouvement généralisé et totalement en suspension symétrique.

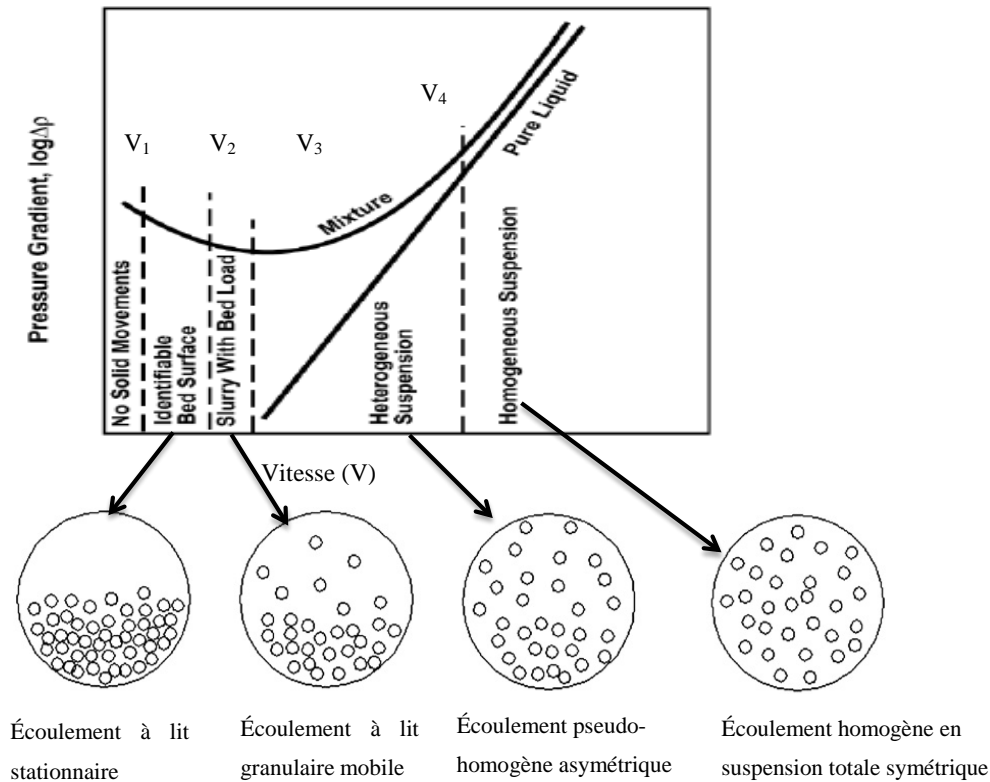


Figure 2.2: Régimes et variation du gradient de pression à l'écoulement des résidus selon les modèles d'écoulement en fonction de la vitesse (adapté de Mohamadbeigy, 2005 et de Ulursarslan, 2008).

2.1.5 Analyse des modèles spécifiques aux résidus miniers denses et critères d'évaluation de la ségrégation

Le régime d'écoulement observé avec les résidus épais et en pâte constitués de particules fines sous pression est un type d'écoulement avec un noyau central plein. Leur écoulement dépend principalement de la finesse des particules et des propriétés rhéologiques, notamment le seuil de cisaillement des résidus pâteux, qui n'autorise pas la ségrégation. Il devient alors impossible d'observer le modèle bicouche de Wilson et *al.*, (1976) car la grande concentration solide et les forces d'attraction inter-particulaires procurent de nouvelles caractéristiques colloïdale et d'homogénéité au matériau qui ne peut plus se séparer en deux phases distinctes. Ces fluides homogènes sont généralement rhéofluidifiants ou thixotropes, c'est-à-dire que leur viscosité

diminue avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement. De ce fait, lorsque ce type de pâte est soumis à l'écoulement sous pression, la contrainte de cisaillement au niveau des parois (τ_w), source de perte de charge, est alors maximale, ce qui correspond à la viscosité minimale. Il se forme alors au niveau des contacts avec les parois, une fine couche de fluide constitué de mélange d'eau et de particules très fines dont le diamètre est inférieur ou égal à $20 \mu\text{m}$ (Pullum, 2007) et cette couche joue un rôle de lubrifiant facilitant ainsi l'écoulement (Kaplan, 2001). Puis, cette contrainte diminue progressivement vers le centre pour atteindre sa valeur minimale correspondant à la contrainte du seuil de cisaillement (τ_0) du matériau. La vitesse de la zone centrale occupée par le noyau central est donc constante. Lorsque la pâte comporte des grains grossiers non « rhéologiquement » actifs selon Pullum (2007), c'est-à-dire ne participant pas à la couche colloïdale de lubrification, ceux-ci peuvent être maintenus en suspension dans la partie centrale plus dense du pipeline grâce au seuil de cisaillement de matériau (τ_0). Ce modèle s'établit également dans l'écoulement du béton frais (Kaplan, 2001).

Ce modèle d'écoulement des résidus miniers en pâte a été étudié dans les détails par Pullum (2007) à l'aide de méthodes techniques performantes de mesure de la vitesse telles que l'Imagerie à Résonance Magnétique (MRI) et la méthode de Vélométrie laser à effet Doppler ou Laser Doppler Velocimetry (LDV), dont les résultats sont montrés à la Figure 2.3.

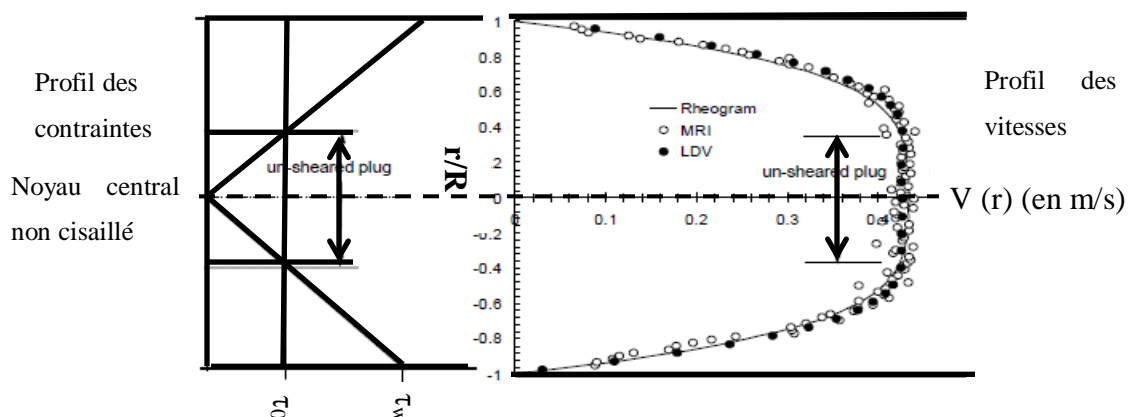


Figure 2.3 : Mise en évidence de modèle d'écoulement homogène par les méthodes d'Imagerie à Résonance Magnétique (MRI) et la méthode de Vélométrie laser à effet Doppler (LDV) (Pullum, 2007).

Sur cette figure, les mesures des profils de vitesse et de contraintes sont rigoureusement en accord avec les résultats des mesures rhéologiques, confirmant ainsi la validité du modèle (Pullum, 2007).

Par ailleurs un écoulement mixte ou hybride selon Pullum (2007), peut s'observer dans les pâtes comportant des particules grossières, c'est-à-dire qu'il existe des particules de taille supérieure à 20 μm ou 75 μm selon les auteurs. Ces particules n'étant pas rhéologiquement actives (non-participation à la formation de colloïde), elles sont enclins à ségréguer en cours de cisaillement même si les tests statiques (mesure de la hauteur de dépôt de particules pour une concentration donnée sur un intervalle de temps selon la loi de Stokes) semblent indiquer une absence de sédimentation (Thomas, 1979; Pullum et Graham, 2007; Cooke, 2002; Wilson et al., 2004;). En effet, dans les conditions statiques, il est défini un seuil de cisaillement critique (τ_{0c}) qui doit obéir à la relation 2.7 selon (Pullum, 2007) pour empêcher la ségrégation.

$$\tau_{0c} \geq k_2 g D_{50} (\rho_s - \rho_l) \quad (2.7)$$

où k_2 est un facteur de forme (≈ 0.1), D_{50} est le diamètre moyen de particules (correspondant à 50% de passant sur la courbe granulométrique), ρ_s et ρ_l sont respectivement la masse volumique des grains solides et la masse volumique du liquide.

Cependant, on a observé la ségrégation dans le transport de résidus miniers dont le seuil de cisaillement était cinq fois supérieur au seuil de cisaillement critique (Pullum, 2007). Gillies et al., (2007) ont également relevé la non pertinence des tests statiques de dépôt pour évaluer les potentialités de ségrégation des particules solides car ceux-ci pouvaient donner des résultats complètement en désaccord lors des essais d'écoulement. Pour ce faire, ils ont proposé de se fonder plutôt sur le ratio de la contrainte de cisaillement aux parois (τ_w) sur la contrainte particulaire moyenne (τ_p). Cette dernière contrainte est obtenue par l'expression 2.8 développée par Wilson et al., (2004).

$$\tau_p = \frac{(\rho_s - \rho_l)gD_{50}}{6} \quad (2.8)$$

Dans cette équation, τ_p est la contrainte de cisaillement causée par la présence de particules solides. Lorsque le ratio τ_w/τ_p est compris entre 60 et 100, la ségrégation est fortement réduite et lorsque ce rapport est supérieur à 100, elle est complètement éliminée.

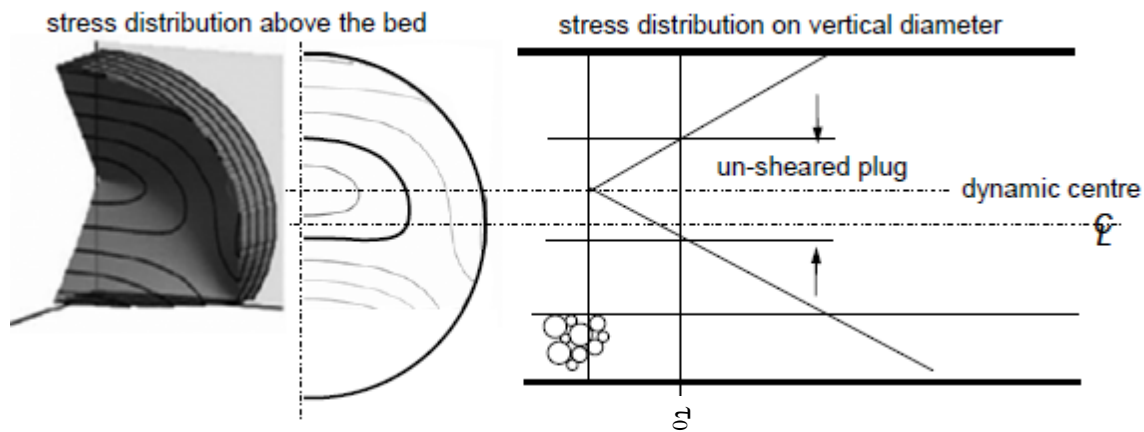


Figure 2.4: Modèle d'écoulement hybride dû à l'effet de la ségrégation (Pullum, 2007)

Dans le cas de présence de particules grossières, l'écoulement est stratifié avec la formation d'une couche à la base du pipeline et le noyau du centre migre vers le haut du lit granulaire comme présenté dans la Figure 2.4. Ce modèle d'écoulement est surtout observé dans les systèmes de co-disposition où les résidus fins sont mélangés avec une certaine proportion de résidus grossiers. Pullum (2007) distingue le modèle d'écoulement granulaire des remblais miniers hydraulique qui serait une variante de ce modèle hybride, c'est-à-dire avec ségrégation de particule.

2.2 Principales configurations pour la mise en place de résidus miniers en pâte

Dans la pratique, l'industrie minière utilise plusieurs moyens pour acheminer les résidus à leur lieu de déposition. Si le transport des résidus en pâte de surface (résidus épaissis) est opéré par l'usage systématique de moyen de pompage en raison des parcours le plus souvent horizontal, trois configurations sont habituellement rencontrées dans le transport des remblais miniers. Le choix d'une de ces options, proposées par Thomas (1979) et présentées à la Figure 2.5, dépend des caractéristiques et conditions des chantiers. Il s'agit des configurations par gravité seule, par gravité et pompage et par pompage suivi de la gravité.

2.2.1 Méthode de gravité et pompage

Dans cette méthode, le remblai est envoyé sous terre par chute libre sur la hauteur verticale et une partie de l'énergie de chute permet l'écoulement sur une certaine distance horizontale avant d'être poursuivi, si nécessaire, par l'usage d'une pompe jusqu'au chantier.

2.2.2 Méthode de pompage et gravité

Le remblai est d'abord pompé dès sa production sur une grande distance horizontale avant de s'écouler par chute libre sur la hauteur verticale. Cette méthode peut être favorable pour les remblais ayant un comportement rhéofluidifiant ou thixotropique car le pompage sur la partie horizontale induira une réduction de la viscosité (par le processus de rhéofluidification et de breakdown) du matériau avant qu'il n'amorce la phase de chute libre verticale.

2.2.3 Méthode par gravité uniquement

Le remblai s'écoule sur des rampes formées d'une certaine hauteur de chute verticale suivie d'une portion horizontale jusqu'à atteindre le chantier à remblayer. Dans ce cas, l'énergie de chute libre doit être suffisante pour surmonter les pertes de charge produites sur la partie d'écoulement horizontale. Cette méthode est très avantageuse en ce sens qu'elle ne nécessite pas d'acquisition de pompe et de consommation d'énergie. Cependant, le remblai doit présenter un affaissement suffisamment faible pour être ainsi opéré.

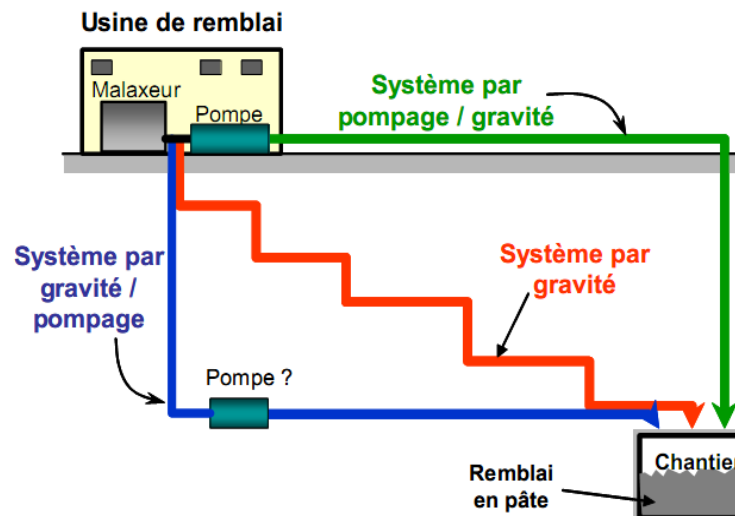


Figure 2.5: Méthodes de transport de remblais miniers (adapté de Thomas, 1979; tiré de Belem et al., 2009).

Sur la portion verticale dans la distribution des remblais miniers par gravité, il est possible de procéder par chute libre sur une certaine hauteur du tube vide pour que la pression sur la portion horizontale soit suffisante pour acheminer le matériau jusqu'à son point de déposition. Dans ce cas, on parle de mode d'écoulement «free flow». Par contre, on peut conduire l'écoulement de sorte à maintenir le tube entièrement occupé par le remblai en tout point. La pâte occupe toute la circonférence du pipeline et forme un continuum le long du tuyau sans aucun espace vide (Li et al., 2002). L'écoulement est alors en charge et le modèle est dit «full flow» ou plein tube. Ces deux grands modes d'opération des pâtes dans les cas de portions verticales sont présentés dans

la Figure 2.6. Cette figure montre aussi la distribution des pressions sur les pipelines. Elles sont fortes au niveau du coude du pipeline et diminuent progressivement vers le point de déposition en raison des pertes de charge sur les parois du pipeline horizontal.

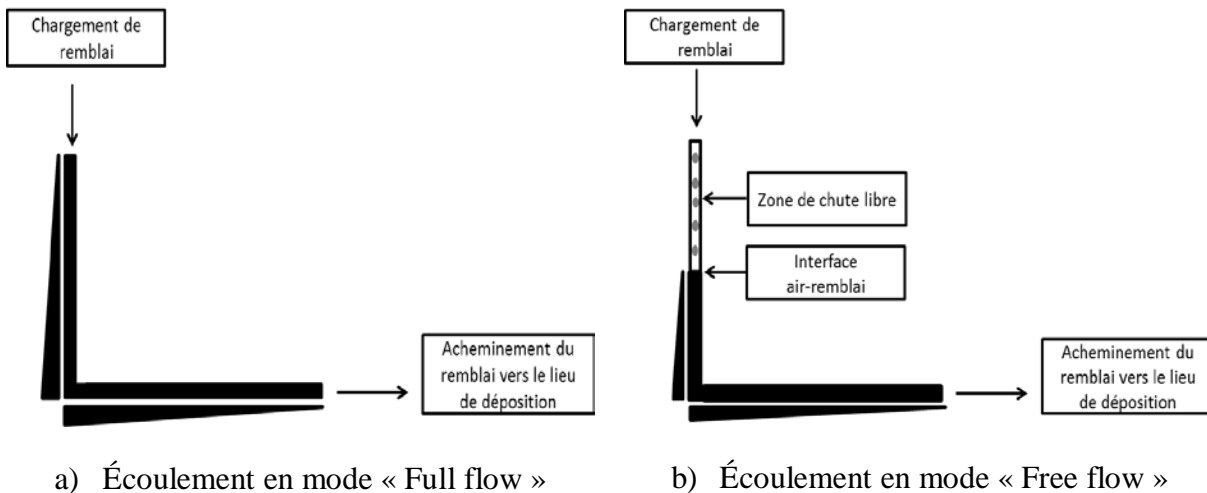


Figure 2.6 : Modes d'opération pour le dépôt des remblais par gravité dans les portions verticales (adapté de Cooke, 2001).

2.3 Place de la rhéologie dans le design des systèmes de transport des résidus miniers

La mise en place d'un système de transport de résidus miniers doit faire l'objet d'une conception minutieuse en amont fondée sur les techniques existantes car elle comprend beaucoup de considérations complexes qui exigent la connaissance de nombreux paramètres inter-reliés. Plusieurs auteurs ont proposé des procédures à suivre pour la conception des systèmes de distribution de résidus miniers en pulpe, épaissis et en pâte (Cooke, 2001; Jewell et al., 2002; Hallbom, 2008). On y relève de légères différences dans l'ordre des opérations selon les auteurs, mais une procédure générale peut se dégager. Elle consiste à réaliser des études préliminaires sur les résidus, notamment la détermination des propriétés géotechniques de base et des propriétés rhéologiques (viscosité et seuil de cisaillement), suivies du choix de la méthode de pompage, puis

d'une phase expérimentale à travers l'exécution d'un essai d'écoulement en temps réel qui permettra de fixer les principaux paramètres d'opération du système, et enfin la mise en place d'un programme de surveillance.

2.3.1 Approche de Cooke (2001)

Cooke (2001) propose une démarche itérative présentée sur le diagramme de la Figure 2.7 pour assurer un bon design du système de transport des remblais hydrauliques, mais peut être généralisée ou adaptée à l'ensemble de système de transport des résidus nécessitant un écoulement en pipeline. Elle présente les étapes successives qui doivent être analysées sous forme de liste de vérification, afin de s'assurer que les exigences techniques sont satisfaites pour chacune de ces étapes avant de passer à l'étape suivante. Ainsi, après la spécification du système en termes de production de résidus (débit d'écoulement), des caractéristiques du site (distance de transport, topographie etc.) et les propriétés de base des résidus (concentration solide, rhéologie, dureté des particules pour l'usure), il est mis en œuvre un test d'écoulement en boucle ou « *loop test* » visant à déterminer le modèle d'écoulement, les pertes de charges et à estimer l'usure des pipelines. Ensuite, on établit le système de distribution en fonction de la configuration des galeries d'exploitation, puis on procède au choix des dimensions des pipelines et des trous de forage. Avec ces données, on effectue une analyse du système pour vérifier la compatibilité du débit, de la pression, du potentiel de cavitation, etc. A l'issue de chaque étape, lorsque les exigences ne sont pas rencontrées, on remonte à l'étape précédente et on fait les changements qui s'imposent. Lorsque les calculs sont en adéquation avec les paramètres, on passe au design de détail. Lorsque toutes les étapes de design sont complétées avec succès, un programme de surveillance doit être établi pour assurer la viabilité du système par un *monitoring* périodique et la maintenance des équipements. C'est une étape clé dans l'exploitation de tout système de distribution (Cooke, 2001).

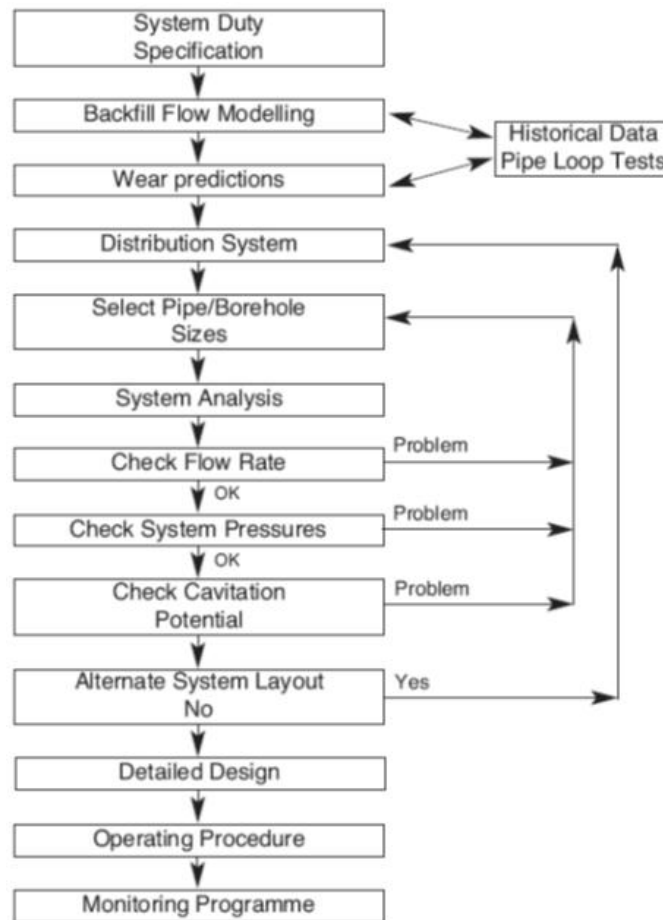


Figure 2.7 : Principales étapes à considérer lors de la conception d'un système de transport de remblai minier hydraulique selon Cooke (2001).

2.3.2 Approche de Boger (2002)

Boger (2002) présente une procédure élargie de design de système de transport qui va de la production des résidus jusqu'à leur dépôt. Cette démarche peut être appliquée à une nouvelle exploitation ou à une ancienne installation dans le but d'optimiser les coûts de transport des résidus. Il distingue trois phases clés à considérer et à analyser selon un ordre précis qui part de la méthode de déposition projetée ou désirée selon les contraintes du site vers l'option de la méthode d'épaississage et de filtration des résidus à envisager. La Figure 2.8 présente ces trois étapes.

- La première étape est consacrée au choix de la méthode de déposition des résidus et ses exigences en termes des propriétés rhéologiques et géotechniques de base analysées avec précision et qui doivent être satisfaites, car elles sont déterminantes pour les étapes subséquentes. Ce type de dépôt peut être des dépôts de surface de résidus épaissis ou en pâte, des dépôts souterrains sous forme de remblais et des dépôts secs sous forme de résidus filtrés etc.
- La deuxième étape porte sur le choix des appareils de pompage et des caractéristiques du pipeline à même d'assurer le déplacement des résidus sur les distances indiquées sans en altérer les propriétés rhéologiques nécessaires au dépôt normal des résidus épaissis, en pâte de surface (angle de déposition d'après Sofra et Boger (2002)). Le choix des pompes se fait selon les pressions requises pour acheminer les résidus. Il est essentiel à ce point de tenir compte de la possibilité d'évolution des propriétés rhéologiques en cours de transport pour effectuer un choix conséquent.
- La troisième étape de cette procédure porte sur le choix du type d'épaississeur et d'appareil de filtration qui seront en mesure de produire les résidus convenables. Cette opération passe par une approche itérative d'optimisation qui intégrera le recours à des produits chimiques tels que les floculants, les dispersants et autres consommables nécessaires pour produire les résidus désirés.

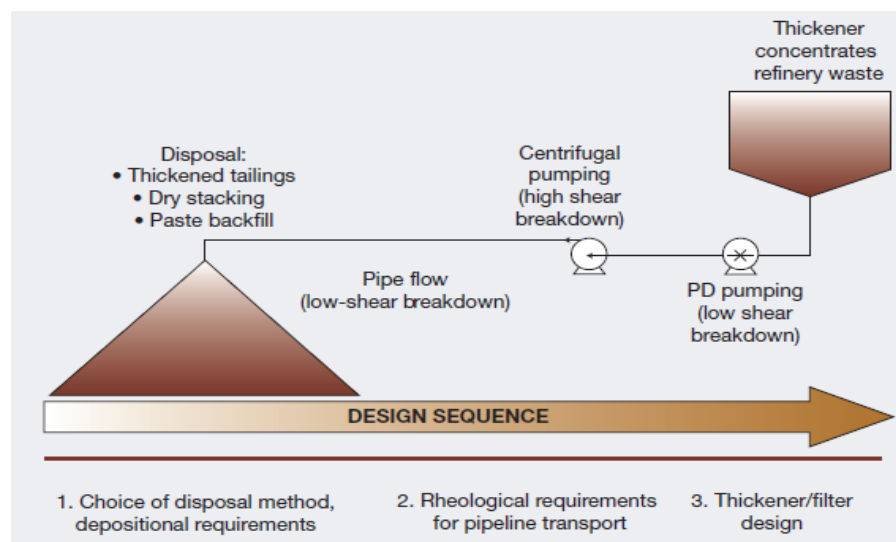


Figure 2.8: Procédure de design d'un système de transport des résidus miniers selon Boger (2002).

2.3.3 Approche de Hallbom (2008)

Hallbom (2008) propose des méthodes de design basées sur le moyen de détermination des pertes de charges car, en définitive, les études pour la mise en place d'un système de transport visent à connaître les pertes de charges dans la canalisation afin d'opérer un choix approprié de pompe et de moteur.

Ainsi, selon qu'on utilise un *loop test* ou les mesures rhéologiques, la démarche à suivre est décrite ci-dessous.

Les étapes suivantes ont été proposées pour la démarche de détermination des paramètres de transport par *loop test* (Hallbom, 2008).

1. Estimer un ordre de grandeur du diamètre du pipeline en accord avec le tonnage des résidus à transporter;
2. Construire le *loop test* avec les sections de mesure comportant les pipelines ayant des diamètres compris dans l'ordre de grandeur arrêté au point 1;
3. Disposer d'un grand échantillon représentatif du matériau solide à transporter;
4. Disposer d'un grand volume du liquide de suspension;
5. Estimer les concentrations solides possibles des résidus à transporter toujours en relation avec le tonnage total de résidus;
6. Procéder à la préparation des échantillons à des concentrations supérieures à la concentration solide visée;
7. Effectuer les mesures de la perte de pression sur une large gamme de débits dans le *loop test*;
8. Diluer les résidus avec le fluide de transport pour obtenir les courbes d'écoulement à différentes concentrations solides.
9. Interpoler les résultats entre eux pour obtenir les pertes de charge en fonction des courbes d'écoulement pour différents diamètres et concentrations solides.

La procédure de calcul des pertes de charge par l'approche rhéologique est la suivante :

1. Disposer d'un rhéomètre standard;
2. Disposer d'un petit échantillon représentatif;
3. Obtenir une petite quantité du liquide de suspension;
4. Déterminer les fourchettes de concentration solide;
5. Préparer 3 échantillons dont un est à la concentration solide visée;
6. Mesurer les contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour obtenir les courbes d'écoulement;
7. Ajuster la courbe d'écoulement obtenue à l'étape 6 avec un des modèles rhéologiques tels que celui de Bingham, de Hershell Bulkley, ou de Casson;
8. Ajuster le modèle physique empirique avec les constantes rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) à différentes concentrations en utilisant les relations existantes entre ces facteurs.
9. Utiliser les relations physiques pour estimer le comportement rhéologique de toutes les concentrations solides dans la fourchette des concentrations solides visées.
10. Utiliser la densité des grains solides et celle du liquide pour calculer la densité du mélange en utilisant les relations mises au point à cet effet.
11. Déterminer la vitesse d'écoulement et les pertes de charge selon les comportements du matériau par exemple utiliser l'équation de Buckingham dans le cas d'écoulement laminaire lorsque son comportement est binghamien. Il est possible de recourir à d'autres équations de conception comme celle de Thomas et Wilson (1985) pour déterminer les paramètres de vitesse d'écoulement et de perte de charge dans un cas d'écoulement turbulent.. Il est recommandé d'utiliser une feuille de calcul pour générer les différents paramètres de transport notamment la vitesse de fonctionnement et la perte de charge en introduisant les spécifications du système ou en les faisant varier pour obtenir les options optimales.

2.4 Principes fondamentaux de la rhéologie

La section précédente montre clairement que la rhéologie a une place essentielle dans les procédures de design du système de transport des résidus miniers. Cette section présentera les notions de base qui sont indispensables à la bonne conduite d'une mesure rhéologique. Elle présente les principes de base et les différentes procédures de mesure de même que les phénomènes perturbateurs susceptibles d'entacher la qualité des mesures avec certaines géométries notamment la plaque parallèle.

2.4.1 Définition de la rhéologie et facteurs d'influence des paramètres rhéologiques

La rhéologie est l'étude de la déformation et d'écoulement de la matière. Elle s'intéresse à la déformation des matériaux soumis à des contraintes. En effet, les éléments constitutifs des matériaux sont dans un état d'équilibre avec des liens qui s'établissent entre ces différents éléments. En présence de sollicitations externes (contraintes de cisaillement), le fluide oppose une résistance interne pour maintenir son état d'équilibre : cette résistance se manifeste par la viscosité.

Certains fluides présentent un paramètre appelé seuil de cisaillement correspondant à la contrainte critique qu'il faut dépasser avant de les mettre en écoulement. La rhéologie des fluides s'attache à rechercher les propriétés intrinsèques du fluide que sont la viscosité et le seuil de cisaillement et se distingue ainsi de la mécanique des fluides qui vise à caractériser la forme d'un écoulement autour d'une géométrie particulièrement, le champ de vitesse étant, dans ce dernier cas, la grandeur essentielle à déterminer.

Considérant l'origine de la viscosité que les fluides exercent lorsqu'ils sont sollicités, il ressort qu'elle peut être influencée de manière notable par certains facteurs. En effet, les positions d'équilibre occupées par les molécules de fluides et les forces qu'elles exercent les unes sur les

autres sont à l'origine de la viscosité. De cette manière, tout facteur physique pouvant affecter cet équilibre thermodynamique aura une incidence sur la viscosité. Au titre de ces facteurs, il y'a la température dont l'augmentation a tendance à accroître l'entropie qui se manifeste par une grande agitation des particules au sein du fluide, ce qui diminue les forces d'attraction entre particules. La viscosité diminuera de manière subséquente selon la loi d'Arrhenius suivante (Barnes et al., 1989):

$$\eta = Ae^{-\frac{B}{T}} \quad (2.9)$$

Dans cette équation, A et B sont des constantes et T est la température.

L'action d'une pression isotrope entraîne une augmentation exponentielle de la viscosité car ce facteur a tendance à rapprocher les particules entre elle et diminue ainsi leur agitation (Barnes et al., 1989).

2.4.2 Principaux types de fluides et notion de lois de comportement

La relation qui s'établit entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement au cours d'un cisaillement simple permet de définir le comportement rhéologique d'un fluide donné car « tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables du mouvement et les grandeurs cinématiques décrivant ce mouvement» (extrait de Baudez, 2001). Cette relation mathématique décrivant l'écoulement d'un fluide, exprime la loi de comportement du matériau. En se basant sur le comportement des fluides, deux grands groupes ont été dégagés. Il s'agit des fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens, dont les caractéristiques seront détaillées dans la section suivante.

2.4.2.1 Fluides newtoniens

Sont considérés comme fluides newtoniens, l'ensemble des matériaux fluides dont la loi de comportement est conforme à la loi de Newton qui établit une proportionnalité entre la contrainte

de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$). Le coefficient de proportionnalité entre ces deux grandeurs correspond à la viscosité dynamique (η) selon l'équation.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.10)$$

Cette loi a pour conséquence selon Barnes et al., (1989) que :

- dans un cisaillement simple, les seules contraintes générées au sein du fluide et à l'origine de son écoulement sont des contraintes de cisaillement, les contraintes normales étant égales à zéro;
- la viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement;
- la viscosité est invariable quel que soit le temps de cisaillement et l'écoulement du fluide est arrêté immédiatement lorsqu'on annule les contraintes.

Cette loi de comportement se traduit par une représentation linéaire de la courbe d'écoulement qui indique l'évolution de la contrainte en fonction du gradient de la vitesse de cisaillement. La courbe correspondant à ce groupe de fluide représentée par la droite 1 sur la Figure 2.9, passe alors par l'origine du repère car en absence de contrainte, il n'y a aucune déformation dans le fluide. L'eau constitue l'exemple typique de fluide newtonien dont la viscosité dynamique à 20°C et à une pression atmosphérique 101325 Pa est de 0,001003 Pa.s.

2.4.2.2 Fluides non-newtoniens

Les fluides n'entrant pas dans la gamme de critères ci-dessus décrits sont classés comme non-newtoniens. Contrairement aux fluides newtoniens dont l'ajustement se fait au moyen d'une équation générale unique, les fluides non-newtoniens font recours à plusieurs lois mathématiques pour leur ajustement en raison de la diversité de comportement qu'ils exhibent selon leur spécificité. Dans cette catégorie, si la contrainte de cisaillement induite par le taux de cisaillement ne varie pas en fonction du temps de cisaillement, on parle de fluide non-newtonien indépendant de temps. La contrainte de cisaillement peut aussi varier non seulement en fonction de la vitesse de cisaillement, mais aussi du temps de cisaillement, dans lequel cas le fluide est classé comme non-newtonien dépendant du temps. La Figure 2.9 représente les différentes courbes

d'écoulement (ou rhéogrammes) des fluides non dépendants du temps. La figure montre que certains fluides ont un seuil de cisaillement τ_0 alors que d'autres n'en ont pas.

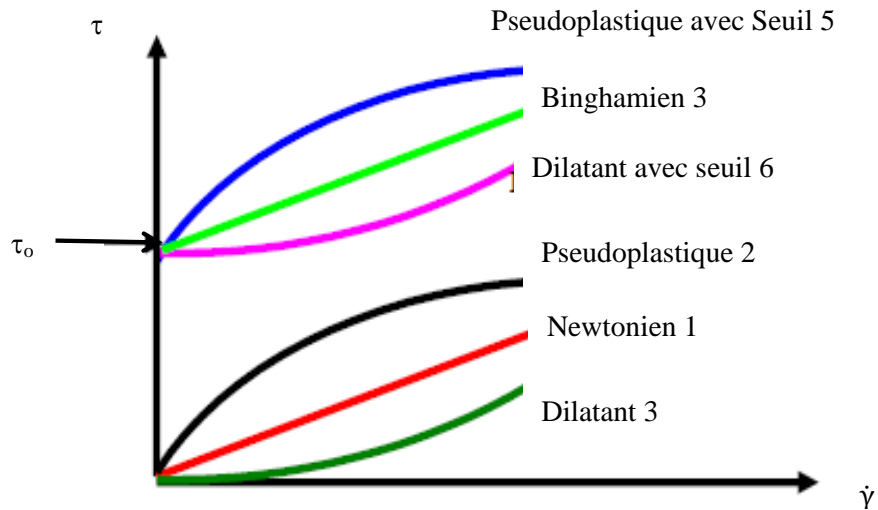


Figure 2.9: Courbes d'écoulement (rhéogrammes) des principaux comportements rhéologiques de fluides non-newtoniens indépendants du temps.

Pour les fluides sans seuil de cisaillement, l'écoulement apparaît dès l'application de la contrainte. Le rhéogramme commence alors à l'origine comme indiqué sur la Figure 2.9. Dans un fluide non-newtonien indépendant du temps et sans seuil de cisaillement, lorsque l'augmentation du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) se traduit par une diminution de la viscosité dans le fluide, on dit qu'il a un comportement rhéofluidifiant ou pseudo-plastique. La courbe d'écoulement 2 indiquée sur la Figure 2.9, caractérise ce comportement. A partir d'une certaine valeur de $\dot{\gamma}$, son augmentation n'a pratiquement pas d'incidence sur la contrainte de cisaillement et la courbe présente alors une asymptote suivant l'axe de taux de cisaillement. Le principe physique à l'origine du comportement rhéofluidifiant est une orientation des particules suivant la direction de l'écoulement pendant le cisaillement entraînant une diminution relative de la contrainte de cisaillement lorsqu'on augmente le gradient de vitesse de cisaillement (Barnes et al, 1989).

Le comportement rhéoépaississant, certes très peu observé dans les fluides courants indépendants du temps et sans seuil de cisaillement, se caractérise par une augmentation de la viscosité consécutivement à une augmentation du taux de cisaillement. Tout se passe comme si la quantité de la substance augmentait, entraînant une plus grande résistance de la part de fluide. On parle aussi de fluide dilatant. La courbe d'écoulement 3 sur la Figure 2.9 qui matérialise un tel comportement, présente une asymptote suivant l'axe des contraintes de cisaillement car une petite augmentation de $\dot{\gamma}$ entraîne une plus grande augmentation de la contrainte (τ). C'est un enchevêtrement plus accru des constituants du fluide qui est responsable de l'accroissement de la viscosité. Ces types de comportement rhéofluidifiant et rhéoépaississant sont ajustés le plus souvent par la loi de puissance ou modèle d'Ostwalde De Waele (Barnes et al, 1989) qui s'écrit :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.11)$$

où K et n sont des constantes ajustés expérimentalement appelés respectivement la consistance et l'exposant de taux de cisaillement. Selon les valeurs de n, on distingue :

- n > 1 pour les fluides rhéoépaississants ou dilatants ;
- n < 1 pour les fluides rhéofluidifiants ou pseudo-plastiques.

Lorsque la mise en écoulement des fluides non-newtoniens indépendant du temps nécessite l'atteinte d'une certaine valeur de contrainte avant d'être initialisée, ces fluides sont dits à seuil de contrainte. Lorsque la contrainte appliquée est inférieure à ce seuil de cisaillement, le fluide se déforme comme un solide élastique qui recouvre son état initial après la suppression de la contrainte.

Si la courbe d'écoulement est linéaire au-delà du seuil de cisaillement τ_0 telle que représentée par la droite 4 sur la Figure 2.9, son comportement est aisément ajusté par la loi de Bingham définie comme suit :

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2.12)$$

η_B est la viscosité plastique de Bingham.

Les fluides à seuil de contrainte peuvent présenter un comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant au-delà de ce seuil τ_0 . Il s'agit de fluides rhéofluidifiants (ou pseudoplastiques) ou rhéoépaississants (ou dilatant) à seuil de contrainte (voir courbes 5 et 6 de la Figure 2.9. Leurs courbes d'écoulement s'adaptent bien au modèle de Herschell -Bulkley ci-dessous:

$$\tau = \tau_0 + K_{HB} \dot{\gamma}^n \quad (2.13)$$

où K_{HB} est la consistance et n l'exposant du taux de cisaillement du modèle. Ces constantes sont déterminées expérimentalement. Selon les valeurs de n , on distingue :

- $n > 1$ pour les fluides rhéoépaississants ou dilatants;
- $n < 1$ pour les fluides rhéofluidifiants ou pseudo-plastiques;

On peut relever que l'équation de Herschell-Bulkley peut être ramenée à des cas particuliers bien connus. En effet, pour $K_{HB} = \eta_B$ et $n = 1$, on obtient un fluide plastique de type Bingham.

Hallbom (2008) ont proposé un nouveau modèle pour l'ajustement de la famille de fluide présentant un comportement plastique à seuil. Le modèle est donné par l'équation suivante :

$$\tau^k = \tau_0^k + (\eta_\infty \dot{\gamma})^k \quad (2.14)$$

Où η_∞ est la viscosité au taux de cisaillement infini, k est l'indice rhéologique du fluide variant de 0,2 à 1 pour les résidus miniers (Hallbom, 2008). Les cas particuliers où $k = 1$ et 0,5 correspondent respectivement aux fluides de Bingham et de Casson ($\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (K_C \dot{\gamma})^{1/2}$).

Dans les fluides non dépendant du temps décrits ci-dessus, pour un taux de vitesse de cisaillement donné, la contrainte enregistrée est constante quel que soit le temps de son

application. Mais si le fluide est dépendant du temps, cette contrainte peut augmenter ou diminuer en fonction du temps d'application. La viscosité de ces fluides varie non seulement en fonction du taux de vitesse de cisaillement, mais aussi en fonction du temps de cisaillement. Les comportements à l'écoulement des différents fluides non-newtoniens dépendants du temps sont montrés à la Figure 2.10. On distingue dans cette catégorie :

- Les fluides thixotropiques caractérisés par une diminution de la viscosité au cours du temps sous un taux de cisaillement constant et capables de recouvrer leur viscosité initiale sur un certain temps après arrêt du cisaillement. La structure du fluide subit une désorganisation en cours de cisaillement et se reconstitue progressivement plus ou moins rapidement pendant une période de repos, lorsque qu'on arrête la contrainte.
- Les fluides anti-thixotropiques ou rhéopexes dont, à l'opposé des fluides thixotropiques, sont caractérisés par un accroissement de la viscosité avec le temps au cours d'un cisaillement à vitesse constante. Ces fluides recouvrent également leur viscosité initiale après arrêt du cisaillement.
- Les fluides viscoélastiques : lorsqu'on leur applique une contrainte de cisaillement très faible pendant un temps court, ces fluides adoptent un comportement hookéen linéaire; c'est à dire que la déformation subie par le fluide peut être résorbée tant que la contrainte n'a pas atteint une certaine valeur critique. Après ce seuil critique, le fluide adopte un comportement visqueux. En réalité la plupart des fluides sont viscoélastiques, mais avec des temps caractéristiques (temps d'apparition de la phase hookéenne) variable.

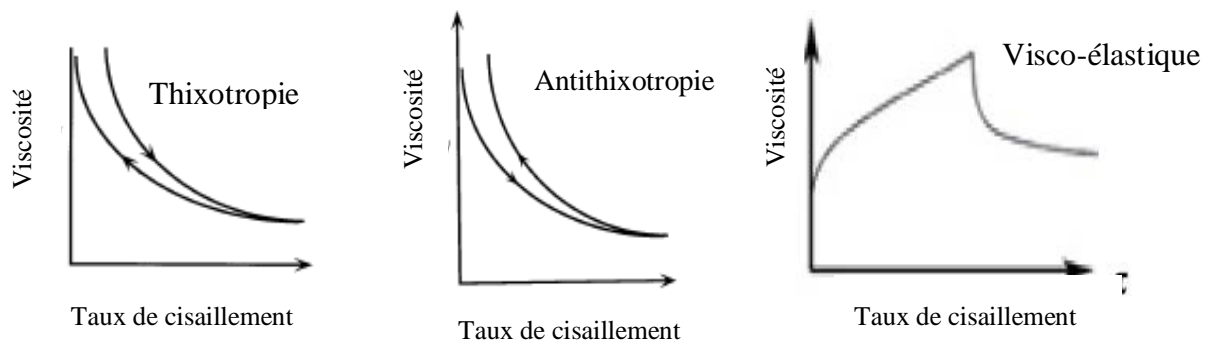


Figure 2.10: Courbes d'écoulement des fluides non-newtoniens dépendants du temps.

2.4.3 Détermination des propriétés rhéologiques

La détermination des paramètres rhéologiques peut se faire au moyen d'approches théoriques et expérimentales. Les approches théoriques sont fondées essentiellement sur les méthodes de calcul des paramètres rhéologiques utilisant les variables caractéristiques du fluide qui sont ensuite validées par des essais. De manière pratique, les paramètres rhéologiques peuvent être obtenus non seulement selon la procédure rhéométrique, qui exige un appareillage léger mais coûteux dont l'interprétation des résultats nécessite un minimum de formation mais aussi à l'aide d'outils simples en raison de corrélations qui peuvent être développées entre les résultats rhéologiques et ceux des méthodes empiriques tels que le test d'affaissement ou *slump test*, et le plan incliné qui sont d'exécution rapide sur le terrain.

2.4.3.1 Approches théoriques ou par calcul

Des équations développées dans la littérature peuvent être utilisées pour le calcul de la viscosité à partir des caractéristiques intrinsèques du fluide. Pour un mélange solide liquide donné la masse volumique de la suspension résultante peut être calculée par la relation Sinclair, et al., 1965; Sukudarnov et al., 2004) :

$$\rho_m = (1 - C_V)\rho_L + C_V\rho_s \quad (2.15)$$

où ρ_m est la masse volumique du mélange, C_V est la concentration volumique solide du mélange, ρ_L est la masse volumique du liquide, et ρ_s est la masse volumique des grains solides.

La viscosité dudit mélange (η_m) est liée à la concentration volumique solide par la relation 2.16 développée par Einstein (1906):

$$\eta_m = \eta_L(1 + 2,5C_V) \quad (2.16)$$

Cependant, cette expression est seulement valable pour les mélanges dont la concentration solide volumique C_V est inférieure ou égale à 1%. Pour les suspensions dont la concentration est

supérieure à 1%, on a recours à la formule polynomiale suivante, où η_L est la viscosité du liquide :

$$\eta_m = \eta_L(1 + a_1 C_V + a_2 C_V^2 + a_3 C_V^3 + \dots) \quad (2.17)$$

Où a_1, a_2, a_3 sont des constantes

Thomas et Wilson (1987) se sont basés sur cette dernière équation qui a été intégrée dans l'équation de Einstein (1906) pour établir une expression plus générale pour les suspension moyennement concentrées (C_V inférieur à 15%; Skudarnov, 2004). Cette relation est la suivante :

$$\eta_m = \eta_L(1 + 2,5C_V + 10,05 C_V^2 + 0,00273e^{16,6C_V}) \quad (2.18)$$

Beaucoup d'auteurs (Skudarnov, 2004; Mohamadbeigy, 2005) utilisent cette expression comme première approximation dans leurs études de la viscosité d'une suspension notamment pour les résidus miniers conventionnels qui sont sursaturés en eau (25 à 45% de solide en masse d'après Bussière (2007) et/ou C_V inférieure à 40% d'après Pullum (2007). Leur viscosité est relativement faible à peine supérieure à celle de l'eau. Ils sont des fluides newtoniens lorsqu'ils sont très dilués (voir) ou non-newtoniens à très faible seuil de cisaillement de l'ordre de 1 à 5 Pa (Li et al., 2002; Hallbom, 2008; Cooke, 2009).

Pour les suspensions plus concentrées, il est fait recours à la relation établie par Krieger Dougherty pour évaluer la viscosité de la suspension (Hallbom, 2008).

$$\eta_m = \eta_L \left(1 - \frac{C_V}{C_{Vm}}\right)^{-2,5C_{Vm}} \quad (2.19)$$

Cette équation utilise la notion de concentration volumique maximale (C_{Vm}) qui est déterminée selon la forme des particules constitutives de la suspension. C'est la concentration limite à laquelle les grains contenus dans un volume donné peuvent se mouvoir sans entrainer une

augmentation de volume. Pour les grains sphériques elle est égale et à 0,567%, 0,670 pour les grains de forme cubique à face centrée et hexagonale.

2.4.3.2 Rhéométrie

L'expérience fondamentale de la mise en évidence de la viscosité est l'utilisation de dispositif composé de deux parties dont l'une est mobile et l'autre immobile, le fluide à tester étant placé entre les deux parties. Il s'agit de privilégier la composante tangentielle d'une force sur un milieu continu : c'est le cisaillement simple. Cela permet de déterminer l'expression de la viscosité.

Pour un matériau fluide donné, la mesure rhéologique vise à établir la relation qui lie la contrainte de cisaillement imposée (τ) au gradient de cisaillement ($\dot{\gamma}$) ou inversement. Dans l'optique de générer une situation de cisaillement simple au sein de fluide et de remonter à sa courbe d'écoulement, des appareils de mesure appelés rhéomètres ont été élaborés à cet effet.

- **Rhéomètre plan-plan ou plaques parallèles**

Le dispositif de mesure présenté dans la Figure 2.11 comprend deux disques coaxiaux entre lesquels le fluide est placé lors des tests. La mise en œuvre des mesures dans cette géométrie consiste à appliquer sur le fluide une contrainte tangentielle engendrée par la rotation du disque mobile selon une vitesse de rotation (Ω), de sorte à ce que les différences des forces normales soient négligeables et obtenir ainsi un cisaillement simple du matériau.

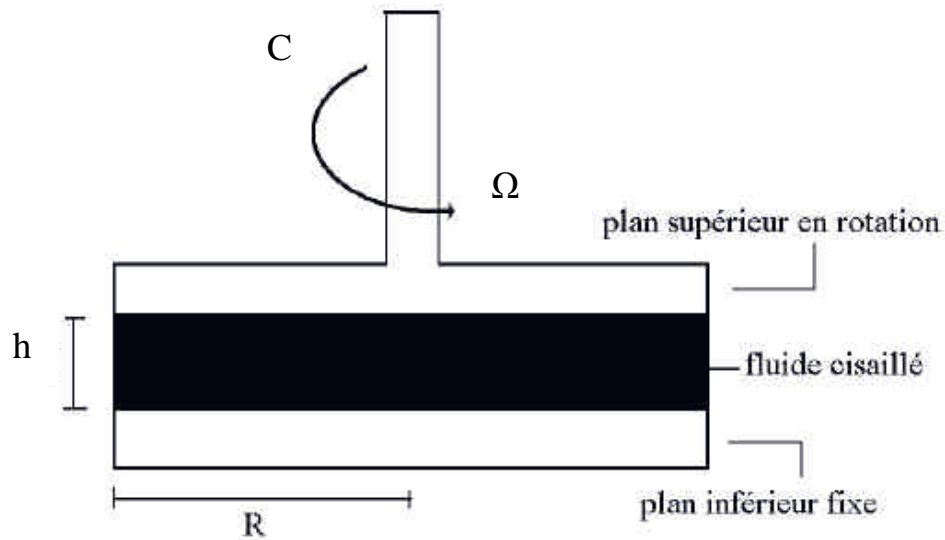


Figure 2.11: Géométrie plan/plan (adapté de Baudez, 2001)

Le couple de torsion (C) exercé par la résistance du fluide au mouvement est mesuré sur la plaque mobile elle-même ou sur celle immobile. Les équations associées à cette géométrie pour déterminer (τ) et ($\dot{\gamma}$) sont données par la littérature tout calcul fait comme suit (Barnes et al., 1989; Macosko, 1993):

$$\tau = \frac{2C}{\pi R^3} \quad (2.20)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R\Omega}{h} \quad (2.21)$$

Avec C le couple de torsion, Ω la vitesse angulaire, R le rayon du disque et h l'ouverture entre les deux disques. Ces deux équations (2.20) et (2.21) permettent d'obtenir l'expression de la viscosité comme suit (Barnes et al., 1989; Macosko, 1993, Davies et Stokes, 2008):

$$\eta = \frac{3Ch}{2\pi\Omega R^4} \left(1 + \frac{d \ln C}{3 d \ln \Omega}\right) = \frac{3Ch}{2\pi\Omega R^4} \left(1 + \frac{\Omega}{C} + \frac{dC}{3 d \Omega}\right) \quad (2.22)$$

Pour effectuer des mesures avec cette géométrie, un accent particulier doit être mis sur le rayon du disque à utiliser car plus la viscosité du fluide est faible, plus grand doit être le rayon des disques pour assurer un cisaillement effectif de l'échantillon dans son intégralité. Un certain nombre de phénomènes perturbateurs présentés plus loin sont associés à cette géométrie.

- **Rhéomètre cône plan**

Le principe de cette géométrie est très semblable à celui des disques parallèles, à la différence qu'un des disques est remplacé par un cône tronqué de même diamètre et dont le sommet est situé sur le disque. L'angle de cône par rapport à la plaque horizontale (Ψ) est généralement très faible de l'ordre de 2° . Le cône et le disque sont coaxiaux et animés d'un mouvement de rotation autour de leur axe commun à une vitesse relative (Figure 2.12). Le matériau à tester est placé en général sur le disque puis le cône est progressivement abaissé jusqu'à la distance appropriée. La plupart des phénomènes perturbateurs évoqués avec le rhéomètre de disques parallèles se retrouvent également dans cette géométrie. Son utilisation exigera les mêmes précautions à observer.

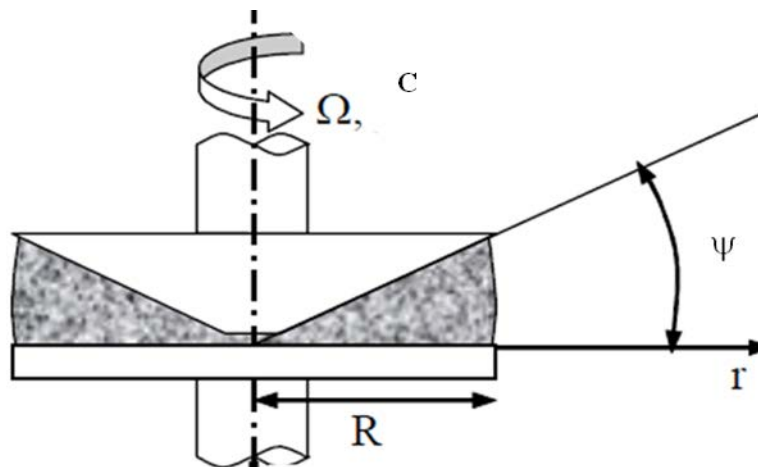


Figure 2.12: Géométrie de cône et plaque (Labiausse, 2004).

Les expressions de la contrainte et le taux de vitesse de cisaillement sont ci-dessous indiquée selon Barnes et al., (1989) comme suit:

$$\tau = \frac{3C}{2\pi R^3} \quad (2.23)$$

En considérant que $\tan \Psi = \Psi$ car l'angle Ψ est très faible, on a .

$$\dot{\gamma} = \frac{r}{h} \Omega = \frac{\Omega}{\tan \Psi} = \frac{\Omega}{\Psi} \quad (2.24)$$

La viscosité s'exprime:

$$\eta = \frac{3\Psi C}{2\pi R^3} \quad (2.25)$$

- **Rhéomètre à cylindres coaxiaux ou couette**

Ce dispositif comporte deux cylindres de révolution coaxiaux de rayons différents R_1 (rayon du cylindre interne) et R_2 (rayon du cylindre externe) et de hauteur H (Figure 2.13). Le principe de fonctionnement de ce rhéomètre consiste à cisailier le fluide dans l'entrefer des deux cylindres. Pour cela, un mouvement laminaire de cisaillement est imposé au fluide en communiquant à l'un des cylindres une rotation à une vitesse uniforme, l'autre cylindre étant maintenu immobile ou également en rotation mais à une vitesse angulaire différente. La caractérisation du comportement rhéologique de la substance cisailée est obtenue à partir du couple résistant (C) et la vitesse de rotation du cylindre mobile (Ω). En régime d'écoulement laminaire uniforme, on calcule aisément la contrainte de cisaillement à la paroi d'un cylindre.

Il a aussi été noté la présence de phénomènes perturbateurs tels que la ségrégation de solide le long des parois source de mesures erronées dans cette géométrie, surtout pour les faibles valeurs de contrainte de cisaillement. De même, des glissements aux bords des cylindres peuvent être également observés.

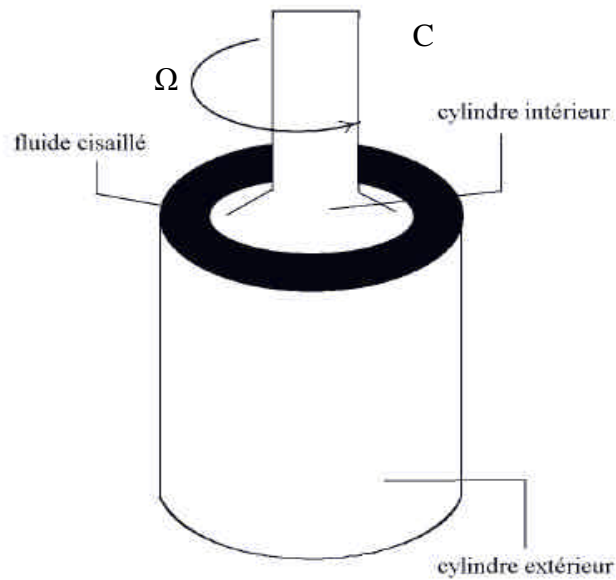


Figure 2.13: Géométrie de cylindres coaxiaux (Baudez, 2001)

Dans cette géométrie la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour un fluide s'écrivent (Baudez, 2001; Feys et al, 2007) :

$$\tau = \frac{C}{4\pi h} \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_1^2 R_2^2} \Omega \quad (2.26)$$

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \Omega \quad (2.27)$$

La viscosité est alors obtenue pour les fluides newtoniens par la relation suivante dite de Reiner Riwlin (Feys et al, 2007):

$$\eta = \frac{C}{4\pi h \Omega} \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right] \quad (2.28)$$

- **Rhéomètre capillaire**

Son principe consiste à faire écouler le fluide dans un tube grâce à une différence de pression en maintenant un régime laminaire. Cette différence de pression peut être induite par les forces hydrostatiques du fluide lui-même comme présenté dans la Figure 2.14-a (surtout pour les fluides à faible viscosité) ou par une pression exercée par un piston tel que indiqué dans la Figure 2.14-b (cas du viscosimètre à extrusion). C'est l'application du principe de Poiseuille qui est le fondement de ce rhéomètre.

L'expression mathématique associée à au rhéomètre capillaire est la suivante Litzenberg, (2003):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8\eta Q}{\pi R^4} \quad (2.29)$$

De cette relation, on peut tirer l'expression de la viscosité:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8Q L} \quad 2.30$$

ΔP différence de pression entre les deux extrémités du capillaire, L longueur du capillaire, R rayon du capillaire, Q débit du fluide au travers du capillaire par unité de temps.

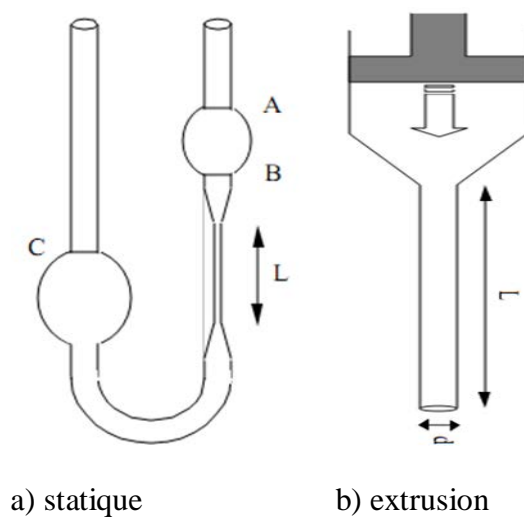


Figure 2.14: Viscosimètres capillaires (a- statique et b- extrusion) adapté de Litzenberg, (2004)

- **Rhéomètre à moulinet ou «vane »**

Cette géométrie est constituée d'un scissomètre ou croisillon comportant quatre palettes de hauteur H formant un cylindre de révolution de diamètre D. Son principe de fonctionnement est fondé sur un mouvement de rotation du scissomètre et l'enregistrement consécutif du couple de résistance (C) appliqué aux palettes par le fluide. Il peut être utilisé selon les mêmes modes de cisaillement que la géométrie de disque. Nguyen et Boger (1983, 1985) ont utilisé cette géométrie pour effectuer une mesure directe du seuil de contrainte de cisaillement. La méthode consiste à appliquer un faible taux de vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) et à enregistrer l'évolution du torque (C) en fonction du temps. La courbe obtenue présente un pic correspondant à la valeur maximale du torque (C_m) comme indiqué dans la Figure 2.15. Cette valeur maximale du torque est reliée au seuil de cisaillement (τ_0) par la relation suivante Boger et al., (2002):

$$C_m = \frac{\pi D}{2} \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \tau_0 \quad (2.31)$$

où D le diamètre du croisillon, et H la hauteur des palettes.

L'équation ci-dessus permet de tirer le seuil de cisaillement τ_0 comme suit :

$$\tau_0 = \frac{2C_m}{\pi D} \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)^{-1} \quad (2.32)$$

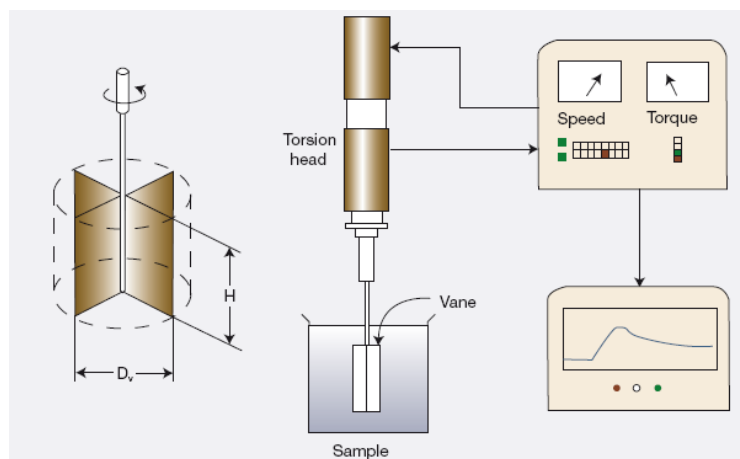


Figure 2.15: Méthode de mesure du seuil de contrainte avec le test de moulinet (tiré de Boger et al., 2002).

2.4.3.3 Phénomènes perturbateurs en rhéométrie et moyens de prévention

Les principaux phénomènes perturbateurs mis en cause au cours d'essais rhéologique des résidus miniers sont le glissement et la fracturation. L'apparition du glissement est consécutive à une décroissance naturelle de la concentration solide près des parois des plaques suite à une sédimentation des grains solides. Cela se traduisant par la formation d'une fine couche de fluide (eau) préférentiellement cisailée par rapport au reste du matériau. Il résulte de ce phénomène une variation notable de la contrainte (τ) pour une faible croissance de gradient de vitesse de cisaillement, donnant l'impression d'une diminution de la viscosité à cette phase (Coussot et Ancy 1999; Baudez, 2001). Cela provoque un profil de vitesse très hétérogène comme indiqué à la Figure 2.16. Pour remédier à cette situation, il est préconisé l'usage de plaques rugueuses dont la rugosité est fonction de la taille des particules solide en présence.

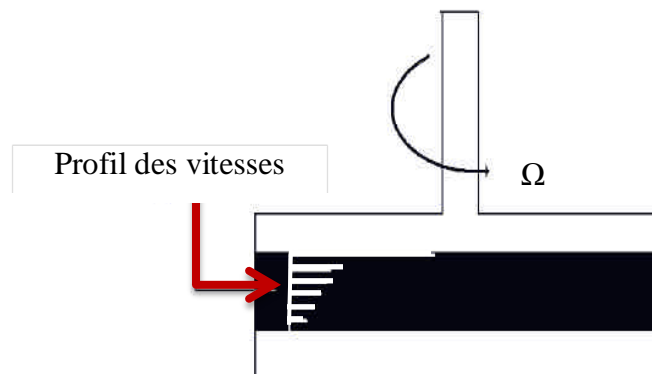


Figure 2.16: Mise en évidence du phénomène de glissement (adapté de Baudez, 2001)

La fracturation est un phénomène de bord qui met en cause l'hypothèse de continuité du milieu qui pourtant autorise l'application des lois de la mécanique des fluides en rhéométrie. Elle résulte d'un creusement qui naît à la périphérie de l'échantillon soumis à l'essai et entraîne un cisaillement par partie du matériau. Cela aboutit à l'obtention d'une courbe d'écoulement présentant une cassure qui correspondrait à une décroissance de la viscosité, ce qui, selon Coussot et Ancy (1999), «ne peut jamais être mis en correspondance directe avec des mesures classiques de rhéométrie». En effet, la plaque en rotation reste solidaire avec une partie de l'échantillon qui est alors entraînée à la même vitesse comme présenté dans la Figure 2.17. Cela

entraîne alors une chute de toutes les composantes de contrainte qui s'accompagne d'un changement dans la forme de la surface libre et d'un mouvement circulaire de l'excès du fluide autour du bord des plaques. En observant l'échantillon après l'essai, on constate qu'une surface horizontale se forme dans l'échantillon à la paroi des plaques et s'agrandit vers le centre, réduisant ainsi la surface réellement cisailée (Barnes et al., 1989; Davies et Stokes, 2008). Ces auteurs avancent comme explication physique du phénomène, une instabilité dans l'écoulement. On remarque le lien pouvant être établi entre ce critère d'apparition de la fracturation et la hauteur d'ouverture de l'entrefer. Cela dénote toute l'importance d'une bonne estimation de cette ouverture qui semble être la source des perturbations relevées dans la géométrie plan/plan.

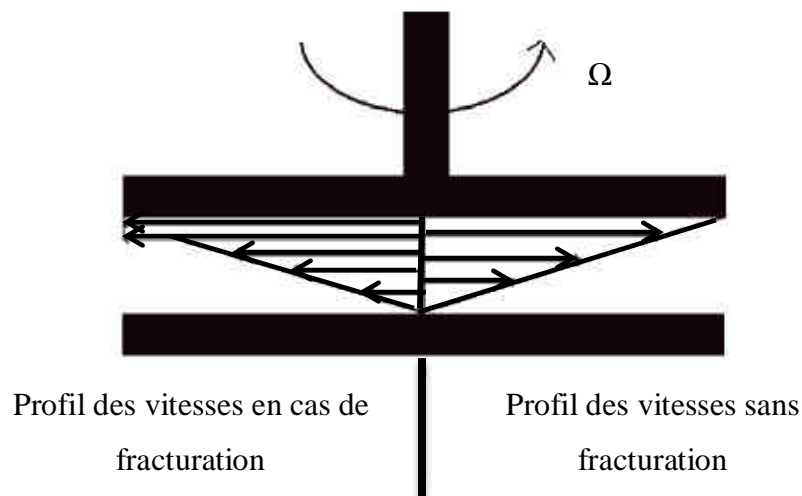


Figure 2.17: Profil des vitesses en cisaillement normal et lors d'une fracturation dans l'échantillon (adapté de Baudez, 2001).

Le creusement est aussi un effet de bord qui se produit essentiellement avec la géométrie à plans parallèles sous la forme d'une diminution du rayon de l'échantillon au niveau de la périphérie des disques. Cette diminution est fonction de la vitesse de cisaillement et de la durée de l'application des contraintes. Ainsi, le volume réellement cisailé devient plus petit que le volume théorique, (voir Figure 2.18). Par rapport aux expressions précédemment définies, on doit tenir compte de cette évolution, et considérer le volume réel et non pas le volume théorique cisailé.

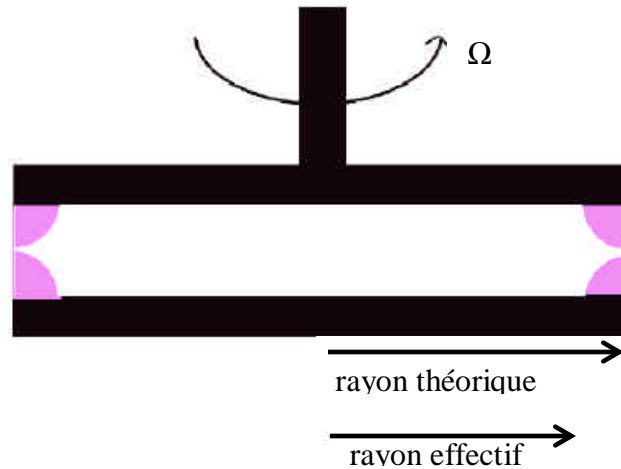


Figure 2.18: Phénomène de creusement (d'après Baudez, 2001)

La Figure 2.19 montre l'effet des différents phénomènes perturbateurs sur la courbe d'écoulement, lors des tests rhéologiques. Il ressort clairement que le phénomène de glissement, de creusement et de sédimentation entraînent une sous-estimation des paramètres, tandis que ceux d'évaporation, et d'excès de volume ont tendance à une augmentation des mesures des paramètres rhéologique.

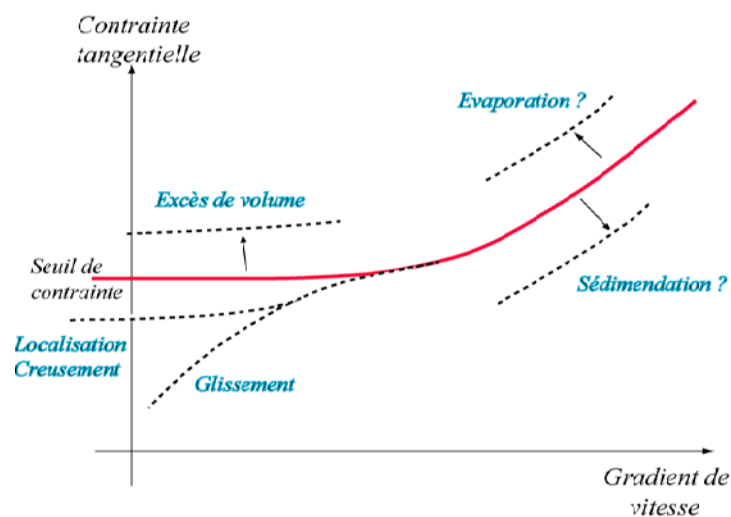


Figure 2.19: Schéma synthétique de l'effet des différents phénomènes perturbateurs sur la courbe d'écoulement (d'après Château, 2007)

2.4.3.4 Test d'affaissement ou «slump test» et technique du plan incliné

Des méthodes indirectes peuvent aussi être utilisées pour déterminer le seuil d'écoulement des matériaux à partir de leur comportement physique à l'aide de dispositifs simples. Ces méthodes se réfèrent à la notion d'ouvrabilité largement utilisé dans le domaine du béton. En effet, l'ouvrabilité ou la maniabilité d'un matériau, tel que utilisée dans le domaine du béton, renvoie selon l'American Concrete Institute (ACI 116 R-00, 73) à “*that property of freshly mixed concrete or mortar that determines the ease with which it can be mixed, placed, consolidated, and finished to a homogenous condition*”. Ces méthodes comprennent, entre autres, le test d'affaissement ou «*slump test*» et la technique du plan incliné.

Initialement développé pour évaluer la consistance et l'ouvrabilité et la consolidation du béton selon sa teneur en eau (Koehler et al., 2003), l'utilisation du test d'affaissement comme méthode solide de détermination du seuil de contrainte pour les résidus miniers denses, dont le remblai, a été proposé par Pashia et Boger (1996). Se basant sur la théorie suggérée par Murata (1984) et corrigée par Pashia et Boger (1996) ont formalisé la théorie et standardisé la pratique par l'utilisation du cône d'Abrams (Figure 2.20). Il s'agit de déterminer le seuil de contrainte d'un résidu densifié à partir d'un volume conique, en mesurant la hauteur d'effondrement du matériau après écoulement sous son propre poids.

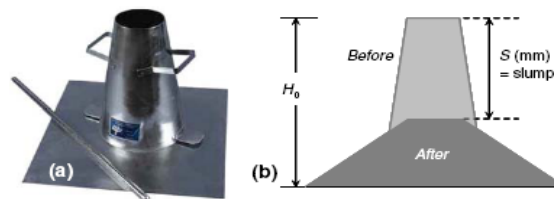


Figure 2.20: Méthode de mesure de l'affaissement (*slump*) avec le cône standard (ASTM C 143)

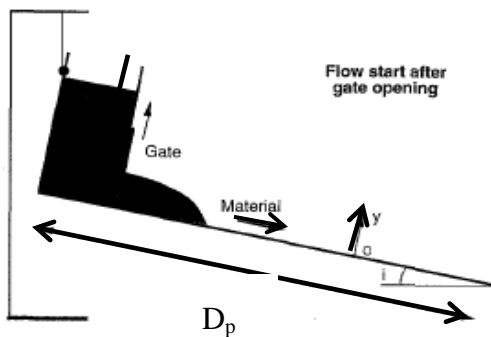
Ferraris et De Larrard (1998) ont proposé la formule ci-dessous pour le calcul du seuil de contrainte τ_0 à partir de la mesure de l'affaissement intégrant le temps:

$$\tau_0 = \frac{\rho g(H-S)}{a} + b \quad (2.33)$$

où τ_0 est seuil de contrainte (Pa), S est l'affaissement final (mm); a , b des constantes du matériel ($a = 347$ et $b = 212$ Pa pour le béton); H la hauteur du cône (mm).

Coussot et Boger (1995) sont à l'origine de l'utilisation de la technique du plan incliné pour l'estimation de seuil de contrainte de matériaux à seuil. Cette technique consiste à laisser écouler un fluide sur un plan d'inclinaison variable entre 10 et 30° dont la longueur est de 1 m et la largeur varie entre 5 et 25 cm (voir Figure 2.21).

Mise en place de l'échantillon



Échantillon après écoulement

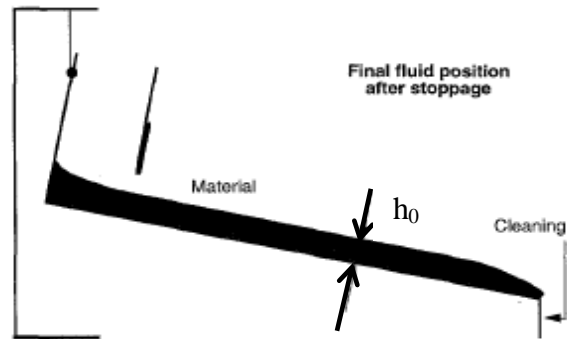


Figure 2.21: Méthode de mesure du seuil de contrainte par la méthode du plan incliné (Coussot et Boger 1995).

L'épaisseur (h_0) de la surface du fluide après l'arrêt de l'écoulement est utilisée dans le calcul de seuil de contrainte donné par la relation (Coussot et Boger 1995):

$$\tau_0 = \rho g h_0 \sin(i) \quad (2.34)$$

Où ρ est la masse volumique du matériau testé, g la gravité, et i l'angle d'inclinaison du plan.

Au regard du nombre important de méthodes de mesure des paramètres rhéologiques exposées dans la section précédente (2.4), il est indispensable d'établir l'état des études rhéologiques en lien avec les résidus miniers qui seront discutées dans la section suivante.

2.5 État des lieux sur les études relatives à la rhéologie des résidus denses

La question de la rhéologie des résidus miniers a été abordée par quelques auteurs qui se sont orientés vers la thématique de l'influence de certains ingrédients sur les paramètres rhéologiques au regard de l'importance de ces derniers pour la maniabilité et le transport.

Clayton (2003) et Grice (2005) se sont intéressés spécifiquement au cas du remblai minier en pâte et ont proposé une loi de puissance pour relier le seuil de cisaillement τ_0 à la concentration solide massique $C_{w\%}$. Cette relation est la suivante:

$$\tau_0 = \alpha (C_{w\%})^\beta \quad (2.35)$$

où α et β sont des paramètres à ajuster expérimentalement.

Gawu et Fourrie (2004), utilisant la méthode de l'essai d'affaissement au cône (*slump test*), et un rhéomètre équipé des géométries de cylindres coaxiaux avec le moulinet, ont évalué le seuil de contrainte de quatre types de résidus densifiés en fonction de leur concentration solide massique ($C_{w\%}$). Les résultats ont montré la possibilité de l'utilisation du *slump test* modifié comme moyen efficace pour l'évaluation du seuil de cisaillement dans des ordres de grandeurs pouvant atteindre jusqu'à 200 Pa. Ils ont par ailleurs abouti, à l'aide de méthodes de régressions, à une relation exponentielle entre le seuil de cisaillement et le pourcentage solide massique de ces résidus. Cette relation a la forme suivante:

$$\tau_0 = a_0 e^{bC_w} \quad (2.36)$$

où a_0 et b sont des constantes ajustées expérimentalement. La concentration solide maximale des résidus testés était inférieure à 75%. De plus, aucun des résidus étudiés ne contenaient de liants cimentaires.

Cooke et al., (1992) ont quant à eux étudié l'influence des liants cimentaires sur les résidus tout venants. L'ajout de liants vise à réduire la perte d'eau, à fournir de la résistance et à éviter la liquéfaction. Ils en déduisent que l'addition de ces liants affecte la rhéologie du mélange par une augmentation du seuil de cisaillement (qui peut être même doublé), de la viscosité et de la vitesse de transition entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent. Ils ont également remarqué que l'ajout de liant dans des résidus de grande concentration solide peut produire un comportement d'écoulement dépendant du temps dû à une hydratation du liant. Cela peut entraîner des blocages dans les tubes de transport.

Kwak et al., (2005) ont abordé l'influence de la teneur en eau de résidus denses sur leur rhéologie et sur leur angle de déposition en surface. Ils sont parvenus à dégager trois valeurs de seuil de cisaillement définis par Barnes et N'guyen (2001), sur la courbe contrainte-temps présentée sur la Figure 2.22, en procédant à des mesures selon la procédure de cisaillement de *peak hold* avec la géométrie de moulinet, telle que décrite par N'guyen et Boger (1983, 1985), et Sofra et Boger (2002). Cette procédure consiste à maintenir un taux de cisaillement faible et constant et à relever la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du temps. Le seuil de cisaillement τ_{0-1} correspond au seuil élasto-plastique (James et al, 1987), τ_{0-2} est le seuil de cisaillement pris comme la valeur maximale de contrainte sur la courbe contrainte-temps et τ_{0-3} est le seuil de cisaillement résiduel qui correspond à la contrainte à laquelle la courbe se stabilise après le pic.

En guise de conclusion de son étude, il suggère de prendre la valeur de τ_{0-1} comme seuil de cisaillement optimal car il présente un meilleur accord avec les résultats de Sofra et Boger (2002) pour prédire l'angle de déposition en surface bien que ces auteurs aient plutôt utilisé le seuil τ_{0-2} .

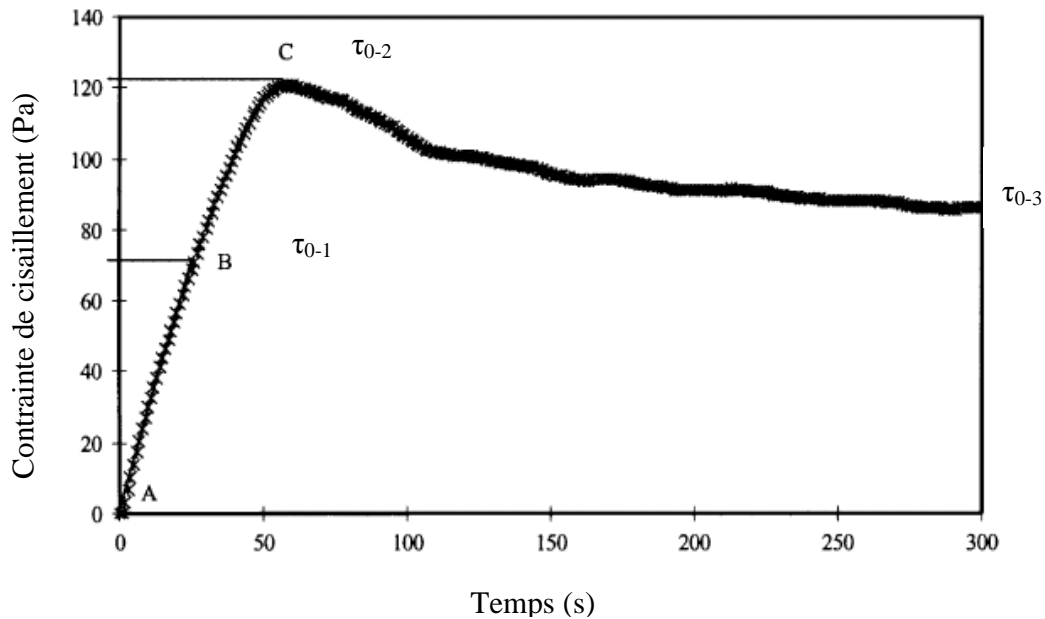


Figure 2.22 : Différents seuils de cisaillement selon la procédure « *peak hold* » avec la géométrie « *vane* » (Kwak et al, 2005)

Huynh et al., (2006) ont évalué l'influence de deux composés chimiques de polymères, le poly phosphate et le formaldéhyde sulfonates de Naphtalène, sur le seuil de cisaillement de remblai minier en pâte. Ils ont d'abord procédé à une mesure initiale du seuil de cisaillement de différents résidus densifiés et de remblais. En jouant sur le pH des résidus, ils ont ensuite augmenté le potentiel zêta des particules des résidus, créant ainsi des sites d'attache des molécules de polymères. Ces molécules ayant un pouvoir de superplastifiant en entraînant une répulsion des grains entre eux ont contribué à réduire le seuil de cisaillement des résidus denses, mais selon des modes d'actions différents. Le poly phosphate agit par augmentation des forces électrostatiques répulsives tandis que le NSF en plus d'accroître les forces de répulsion augmente également les forces stériques les rendant ainsi plus efficaces.

Ercikdi et al., (2010) ont analysé l'effet des adjuvants réducteurs d'eau (lignine sulfonique) et super plastifiants (le condensé de sulfonates de polynaphtalène et le condensé de polycarboxylate) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des remblais élaborés à base de résidus riches en sulfure (26,2 % de sulfure). Les réducteurs d'eau ont conduit à une réduction du

rapport eau-ciment (e/c) d'un pourcentage de l'ordre de 5 à 7 % pour un même affaissement au cône standard d'Abrams (*slump* de 7 pouces). De même, une augmentation des performances mécaniques ($UCS > 0,7$ MPa à 28 jours) des remblais grâce à l'action des superplastifiants a été notée. Leur effet se traduit par une réduction des fissures au sein des éprouvettes de remblais et l'absence dans la microstructure d'hydrates secondaires comme l'étringite et le gypse responsables du phénomène d'attaque sulfatique. Si ces études sont concluantes sur le plan de la maniabilité des résidus, son usage à grande échelle peut engendrer des coûts supplémentaires à l'opération de remblayage (Belem et al., 2009).

A côté de la méthode rhéométrique qui exige un appareillage léger mais coûteux dont l'interprétation des résultats nécessite un minimum de formation, existent des techniques simples et éprouvées tels que le *slump* test ou test d'affaissement au cône et le plan incliné qui sont d'exécution rapide sur le terrain. Cependant, en raison de leur caractère en partie empirique ou semi-empirique, leurs résultats en termes de seuil de cisaillement des résidus densifiés selon les pourcentages de solides ou de liant, mériteraient une validation scientifique à travers une corrélation avec des mesures au rhéomètre.

Le transport des résidus densifiés par pipeline se fait à un régime laminaire dans lequel cas, le gradient de pression est peu sensible à la vitesse d'écoulement dans le tube (Litzenberg, 2004). Cela nécessite une consommation énergétique acceptable. À ce régime, si le mélange est assez homogène au niveau du pipeline, et si les comportements des résidus sont considérés conformes au modèle pseudo-plastique de Bingham, il est possible de calculer les gradients de pression à partir de l'équation de Buckingham, à condition de connaître les paramètres rhéologiques du mélange (Cooke, 2009). L'un des problèmes qui survient lorsqu'on opère à ce régime est la sédimentation à l'intérieur des pipelines. Par contre, une augmentation de la vitesse de transport des résidus se traduirait par l'apparition d'un régime turbulent due à une augmentation des forces d'inertie, ce qui engendre une grande consommation d'énergie. Cependant, compte tenu de la non-homogénéité des mélanges de résidus dans le pipeline, l'équation de Buckingham n'est pas très appropriée pour prédire le gradient de pression (Cooke, 2009). L'optimisation du transport passe également par une meilleure détermination de la valeur réelle du seuil de cisaillement. Cela

aura une incidence sur l'estimation de l'énergie de pompage dans la mesure où le seuil de cisaillement exprime la résistance à franchir pour amorcer l'écoulement du fluide. Ces constats amènent à explorer en profondeur les voies et moyens pour obtenir ces paramètres avec une plus grande précision, ce qui contribuera à améliorer les procédures de design.

2.6 Détermination des paramètres de transport par les approches rhéologiques

Les propriétés rhéologiques constituent les données systématiques à connaître pour opérationnaliser de manière adéquate un système de transport dédié à des matériaux en pâte. En effet, ces paramètres rhéologiques rendent compte de l'état de consistance des résidus et partant leur aptitude à l'écoulement comme relevé par Wilson (2004). Disposant de ces données, cela rend possible le calcul des autres paramètres de transport pour déterminer la performance du système de distribution, afin d'évaluer avec une plus grande précision les caractéristiques de transport des résidus (débit d'écoulement, perte de charge par unité de longueur, et la consommation d'énergie dans tout le système). Ces paramètres vont conditionner le choix des options sur plusieurs points dans le processus de transport, dont la vitesse d'opération et le régime d'écoulement tel qu'illustré par la Figure 2.2. En raison des imprécisions pouvant être relevées dans la mise en œuvre d'essais d'écoulement en boucle, tels que la non représentativité des matériaux (Clark et Vickery, 1995; Li et *al.*, 2002) et la dégradation subie par ceux-ci lors des tests (Sundviqst et al., 1996), il est possible de faire un design de système de transport sur des centaines de kilomètres de long en se basant uniquement sur les données rhéologiques (Hallbom, 2008). Il faut néanmoins mentionner que le design du système de transport basé sur les propriétés rhéologiques est applicable si le matériau est incompressible et s'écoule sous pression sans ségrégation.

2.6.1 Calcul des pertes de charge

Le calcul de la perte de charge dans la conception de l'écoulement par pipeline des résidus en pâte est basé sur les relations générales établies telles que présentées dans la section 2.1.3. Il s'agit de l'expression de Darcy-Weisbach applicable aux résidus qui sont considérés comme des fluides incompressibles. La particularité réside dans les caractéristiques des résidus qui sont exprimées par leur densité et leur loi de comportement rhéologique (la viscosité et le seuil de cisaillement).

Les résidus miniers en pâte homogène sont considérés sur le plan rhéologique comme des fluides viscoplastiques avec seuil d'écoulement. Leur écoulement peut être alors ajusté aux modèles de Bingham ou de Hershell-Bulkley ou la loi proposée par Hallbom (2008). L'intégration des lois rhéologiques dans l'expression de Darcy-Weisbach permet de prédire les pertes de charge pour un résidu en pâte homogène. Dans ce type de régime, il est admis que le matériau est incompressible et s'écoule sous pression en charge (toute la section du pipeline est pleine).

2.6.1.1 *Modèle de Hershell-Bulkley*

La formulation du modèle de Hershell-Bulkley peut être utilisée comme un modèle de référence pour une famille de comportements (Newtonien, Binghamien, Ostwald de Walae) car ces modèles peuvent être déduits de celui de Hershell-Bulkley en substituant dans cette formule les paramètres adéquats. A cet effet, les démonstrations seront faites avec ce modèle car les autres peuvent y être déduits aisément. La Figure 2.23 schématise ce modèle d'écoulement avec la distribution des vitesses et le profil des contraintes selon le rayon de la section du tuyau R , le rayon r_0 du bouchon central dû au seuil de cisaillement et un rayon intermédiaire r quelconque pris entre r_0 et R .

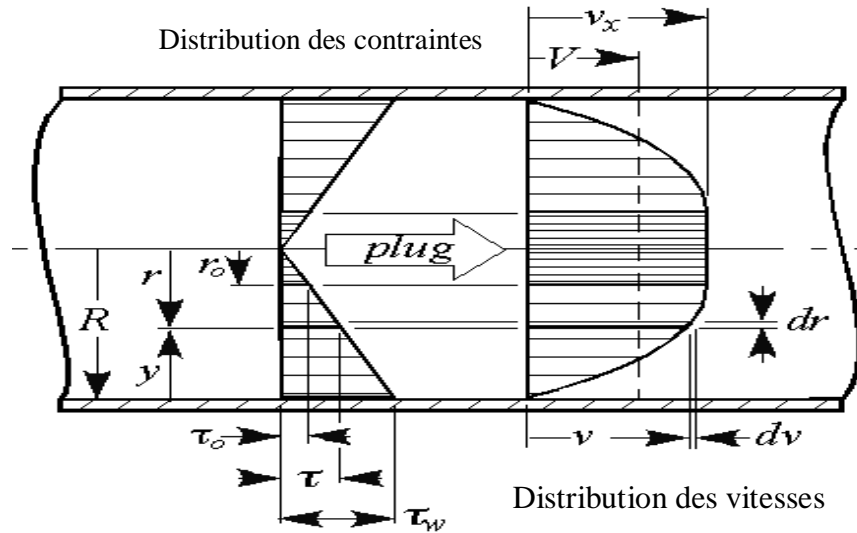


Figure 2.23: Modèle d'écoulement homogène de résidus épaissis et en pâte (Warman Int., 2000)

D'après Cooke (2009), l'écoulement des résidus en pâte n'est opéré qu'en régime laminaire à cause de la demande en énergie requise pour atteindre un régime turbulent. De plus, les pertes de charge sont nettement plus élevées en régime turbulent que laminaire.

Dans le cas d'écoulement en charge à travers un pipeline, les forces de frottement qui induisent les contraintes de cisaillement à la paroi (τ_w) et les forces de pression sont en équilibre. Cela permet d'écrire la relation suivante :

$$S_N \times \Delta P = \tau_w \times S_l \Rightarrow \pi R^2 \Delta P = 2\pi R L \tau_w \Rightarrow \tau_w = \frac{\Delta P D}{4L} \quad (2.37)$$

où S_N la section normale et S_l la surface latérale du tuyau sur laquelle s'exercent les forces de frottement.

Dans un écoulement laminaire en pipeline de rayon R , le débit volumique Q et la vitesse d'écoulement sont exprimés par les relations suivantes:

$$Q = V \times S = V \times \pi R^2 \Rightarrow V = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (2.38)$$

D'après la relation de l'équation 2.37, la contrainte de cisaillement aux parois du pipeline est exprimée par la relation (Li et al., 2002):

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4\Delta L} = \frac{D}{4}j = \frac{R}{2}j \quad (2.39)$$

En utilisant le lien entre les forces de frottements aux parois exprimées par les contraintes de cisaillement et les forces de pression on obtient l'expression différentielle de la vitesse sur tout le rayon du pipeline. Les relations intégrales ont permis de déterminer la différentielle de la vitesse par la relation (Eberl et Eberl, 1995).

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{8v}{D} \quad (2.40)$$

Darby (1984) a établi la relation suivante pour le calcul de la contrainte de cisaillement aux parois pour un fluide de Hershell-Bulkley (voir équation 2.13) fondé sur les paramètres du modèle que sont τ_0 , K_{HB} et n .

$$\tau_w = \tau_0 + K_{HB} \left(\left(\frac{8v}{D} \right) \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \right)^n [A]^{-n} \quad (2.41)$$

Le facteur de friction f est calculé par la relation :

$$f = \frac{2H_{eHB}}{R_{eHB}^2} + \frac{16}{R_{eHB}} [A]^{-n} \quad (2.42)$$

On détermine le nombre de Reynolds de Herschell-Bulkley à partir de la relation générale du nombre de Reynolds applicable à tout type de fluide non-newtonien, développée par Metzner et Reed (1955).

$$R_{eMR} = \frac{\rho D^n V^{2-n}}{K 8^{n-1}} \quad (2.43)$$

Appliqué au cas d'un fluide de Herschell Bulkley, cela donne

$$R_{eHB} = \frac{\rho_m D^n V^{2-n}}{K_{HB} 8 \left(2 \frac{(3n+1)}{n} \right)^n} \quad (2.44)$$

Le nombre de Hedström pour le cas de fluide de Herschel-Bulkley (H_{eHB}) est aussi calculé par l'équation ci-dessus:

$$H_{eHB} = R_{eHB}^2 \frac{\tau_{0HB}}{\rho_m V^2} \quad (2.45)$$

On obtient A par la relation suivante (Bouzaiene, 1995) :

$$A = \left(1 + \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^3 + 2 \frac{(3n+1)}{2n+1} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right) \left(\left(1 + \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^2 + \frac{(3n+1)}{n+1} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^2 \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right) \right) \quad (2.46)$$

Les pertes de charge peuvent être calculées selon le modèle d'écoulement du fluide.

2.6.1.2 *Modèle de comportement binghamien*

Pour le cas particulier des fluides de Bingham, $K = \eta_B$ et $n=1$. Le coefficient de friction (f) est calculé à partir de l'équation suivante ou par le diagramme de la Figure 2.24 (Bouzaiene, 1995).

$$\frac{1}{Re_B} = \frac{f}{16} - \frac{H_e}{6Re_B} + \frac{H_e^4}{3\rho Re_B} \quad (2.47)$$

avec Re_B , le nombre de Reynolds de Bingham et H_{eB} le nombre de Hedström respectivement calculés par les équations

$$Re_B = \frac{\rho V D}{\eta_B} \quad (2.48)$$

$$He_B = \frac{\tau_0 \rho D^2}{\eta_B^2} \quad (2.49)$$

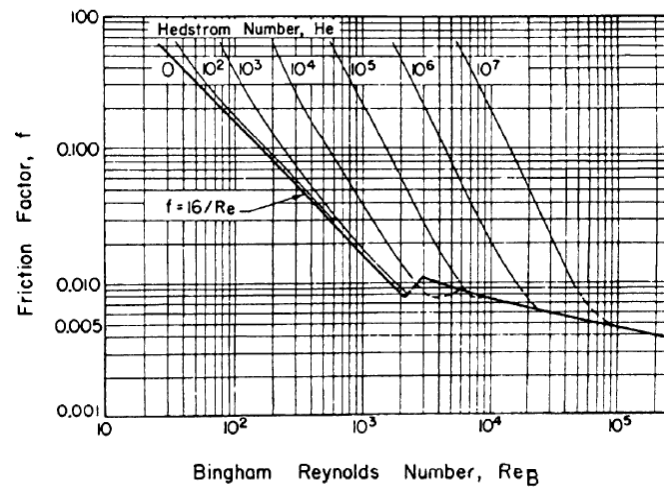


Figure 2.24 : Diagramme de calcul de f pour les fluides Binghamiens (Bouzaiene, 1995)

En considérant les résidus en pâte comme un fluide de Bingham et en intégrant les paramètres dans les calculs, la perte de pression peut être aussi obtenue à partir de la relation de Buckingham (1922) dans un écoulement en régime laminaire. Cette formule s'écrit comme suit:

$$j = \frac{32V\eta_B}{D^2 \left(1 - \frac{4\tau_w}{3\tau_0} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_w}{\tau_0} \right)^4 \right)} \quad (2.50)$$

Avec j la perte de pression par unité linéaire (Pa/m), D le diamètre du tube, V la vitesse moyenne dans le tube, η_B la viscosité plastique de Bingham, (τ_w) la contrainte de frottement au mur (voir équation 2.37 et τ_0 le seuil de cisaillement de la pâte.

2.6.1.3 Modèle de Hallbom (2008)

Hallbom (2008) ont développé, sur la base de l'équation 2.14, de nouveaux diagrammes indiquant directement l'évolution de la perte de charge en fonction de la variation de la vitesse d'écoulement ou du débit, ce qui est très pratique pour les travaux d'ingénierie.

Ces auteurs ont introduit deux nombres adimensionnels Z ou ratio de contrainte et le nombre Ha défini comme suit Hallbom, (2008):

$$Z = \frac{\tau_0}{\tau_w} \quad (2.51)$$

$$Ha = \frac{H_e}{Z} = \frac{\tau_w \rho D^2}{\eta_\infty^2} = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{\rho D^3}{4\eta_\infty^2} = \frac{f_N R_e^2}{2} \quad (2.52)$$

où η_∞ est la viscosité correspond au taux de cisaillement à l'infini.

Les expressions du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour les cas particuliers de fluides de Bingham, de Casson et le cas général du modèle de Hallbom sont présentées au

Tableau 2.2 suivant :

Tableau 2.2 : Expressions du taux de cisaillement et de Ha pour différents comportements selon les différents auteurs d'après le modèle de Hallbom

k (voir eq. 2.14)	Expression de $\dot{\gamma}$	Expression de Re en fonction de H_a
$\tau_0 = 0$ pour les fluides Newtoniens	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_w}{\eta}$	$Re_{ep} = \frac{H_a}{8}$
1 ou Binghamien	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_w}{\eta_\infty} \left(1 - \frac{4Z}{3} + \frac{Z^4}{3} \right)$	$Re_{ep} = \frac{H_a}{8} \left(1 - \frac{4Z}{3} + \frac{Z^4}{3} \right)$
0,5 ou de Casson	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_w}{\eta_\infty} \left(1 - \frac{16Z^{1/2}}{7} + \frac{4Z}{3} + \frac{Z^4}{21} \right)$	$Re_{ep} = \frac{H_a}{8} \left(1 - \frac{16Z^{1/2}}{7} + \frac{4Z}{3} + \frac{Z^4}{21} \right)$
k (en général)	$\dot{\gamma} = \frac{4\tau_w}{\eta_\infty} \int_z^1 z^2 (z^k - Z^k)^{1/k} dz$	$Re_{ep} = \frac{H_a}{8} (1 - Z^k)^{\frac{3}{(3-k)k}}$

H_a est directement proportionnel à la perte de charge, tandis que Re est plutôt directement proportionnel à la vitesse. Donc la représentation de H_a en fonction Re donne un diagramme de conception qui permet de rendre compte de la courbe d'écoulement comme présenté à la Figure 2.25. À partir de cette courbe, il est possible d'accéder à la perte de pression pour une vitesse d'écoulement fixée

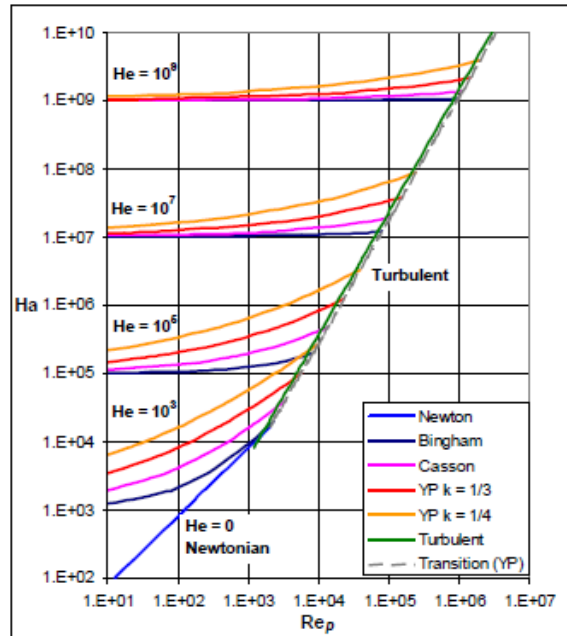


Figure 2.25 : Diagramme de conception de l'écoulement des fluides plastiques à seuil de cisaillement proposé par Hallbom (2008)

2.6.2 Calcul de la vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement au point de transition entre le régime laminaire et turbulent correspond à la vitesse qui minimise les pertes de charge et optimise la consommation d'énergie. Elle correspond donc la vitesse d'opération optimale qui doit être déterminée. Cette vitesse d'opération de l'écoulement de résidus miniers en pâte, dont le comportement est Binghamien, est calculée selon la formule proposée par Slatter et Wasp (2000) :

$$V_T = k_1 \sqrt{\frac{\tau_{0B}}{\rho_m}} \quad (2.53)$$

Où V_T est la vitesse de transition, k_1 est une constante qui varie en fonction de l'intervalle de Re (définie par l'équation 2.3).

Wilson et Thomas (2006) ont mis en évidence la vitesse de transition entre le régime laminaire et le régime turbulent sur un graphe représentant le nombre de Reynolds en fonction du nombre de Hedström (He). À travers la Figure 2.26, Hallbom (2008) exprime le nombre de Reynolds Re en fonction de nombre de Hedström He pour son modèle de fluide plastique à seuil et compare avec l'expression d'autres auteurs comme Slatter et Wasp (2000), Wilson et Thomas (2006) et Hanks (1963) pour le cas d'un fluide de Bingham R_{eB} .

Tableau 2.3 : Reynolds critique Re_c entre le régime laminaire et turbulent selon les auteurs

Valeur de He	Rec d'après Slatter et Wasp (2000)	Rec d'après Wilson et Thomas (2006)
$0 < He < 1700$	2100	2100
$1700 < He < 10^5$	$Re_c = 26He^{0,35} = (K_p Z)^{0,35}$	$Re_c = 30\sqrt{He}$
$He > 10^5$	$Re_c = 26\sqrt{He} = 26\sqrt{K_p Z}$	$Re_c = 25\sqrt{He} = 25\sqrt{K_p Z}$

Le point de transition entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent est mis en évidence sur la courbe à partir de la valeur du nombre de Reynold critique Rec et ce nombre étant relié à la vitesse permet alors d'accéder à la vitesse de transition ou vitesse critique. Le Tableau 2.3 donne les expressions proposées par différents auteurs pour calculer la vitesse de transition correspondant au nombre de Reynolds critique Rec dépendamment du nombre de Hedström.

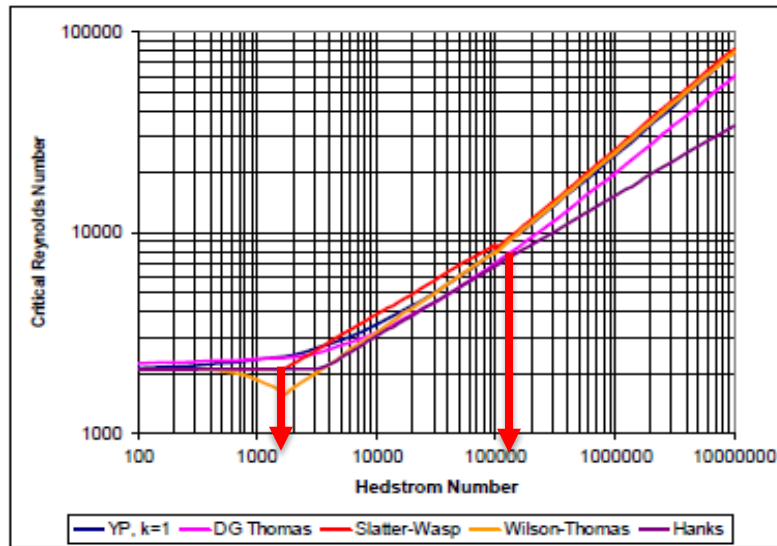


Figure 2.26 : Comparaison des méthodes de détermination du nombre de Reynolds critique Re_c pour un fluide de Bingham (adapté de Hallbom, 2008).

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Matériaux

Les matériaux entrant dans l'exécution de cette étude comprennent en premier lieu les résidus miniers provenant des mines de la région abitibienne, précisément de la mine Doyon de Iamgold et de la mine LaRonde de Agnico Eagle. Les résidus ont fait l'objet de caractérisation visant à déterminer leurs paramètres physico-chimiques, notamment les paramètres en rapport avec leur comportement rhéologique comme la distribution granulométrique, la densité spécifique de grains solides, la minéralogie etc.... Le rhéomètre rotatif AR 2000 de la compagnie TA instrument est l'appareil principalement utilisé pour l'acquisition des données rhéologiques (voir section 3.1.2). Par ailleurs une partie des mesures rhéologiques, notamment celle entrant dans le cadre de la phase de validation des procédures, a été réalisée à l'Université de Sherbrooke en utilisant un viscosimètre ConTec fonctionnant selon le principe des cylindres coaxiaux ou système de Couette. Une description des outils simples d'évaluation de la consistance des matériaux cimentaires utilisés dans cette étude, comme le petit cône d'Abrams, le mini-cône d'écoulement et le V-funnel, est présentée dans ce chapitre.

3.1.1 Caractérisation des résidus miniers

Les résidus miniers ont été échantillonnés sur les sites des mines Doyon et LaRonde et livrés dans des barils de 200 litres. Un échantillonnage rigoureux des résidus sur l'axe transversal dans ces barils a d'abord été réalisé à l'aide d'une tarière afin de disposer d'échantillons représentatifs du contenu de chaque baril sur lesquels seront effectuées les différentes caractérisations. Ces caractérisations ont porté sur la détermination de la densité spécifique des grains solides (D_r), la teneur en eau massique des résidus ($w\%$), la distribution granulométrique et la composition minéralogique. Les valeurs de la teneur en eau massique initiale ($w_0\%$) et D_r sont indispensables

dans le calcul des proportions initiales des différents ingrédients de chaque recette de mélange (eau, résidus, liant) à préparer, notamment la quantité de résidus à prélever, la masse de liant qui sera utilisée et le volume d'eau de mélange à ajouter. La distribution granulométrique et la composition minéralogique ont une influence directe sur la conduite des essais au rhéomètre et le comportement rhéologique des matériaux car elles sont à l'origine du degré de plasticité des résidus.

3.1.1.1 Teneur en eau massique initiale

La première caractérisation a concerné la détermination de la teneur en eau $w(\%)$ des résidus. Pour cela, un échantillon de résidus humides de masse (M_h) d'environ 100g, a été placée à l'étuve réglée à 50°C jusqu'à son séchage total c'est-à-dire jusqu'à l'obtention d'une masse sèche constante après des mesures consécutives de 24h d'intervalle. La détermination de la masse sèche permet de calculer la teneur en eau massique $w(\%)$ qui correspond au rapport de la masse d'eau (M_e) de l'échantillon et de la masse sèche (M_s).

$$w(\%) = \frac{M_e}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\%S = \frac{100}{100+w(\%)} \quad (3.2)$$

La teneur en eau et le pourcentage de solides massiques des résidus des mines LaRonde et Doyon sont présentés dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Teneur en eau et pourcentage solide massique des résidus des mines LaRonde et Doyon

	Échantillon de LaRonde	Échantillon de Doyon
Teneur en eau massique (w%)	29,7	22,7
Pourcentage de solides massique (%S)	77,1	81,5

Les teneurs en eau sont respectivement de 29,7 % et de 22,7 % pour les résidus de LaRonde et de Doyon; les pourcentages de solides correspondants sont de 77,1 % et de 81,5 %. Par la suite, des échantillonnages par batch ont été réalisés avec à chaque fois une détermination de la teneur en eau massique avant l'utilisation des résidus dans la préparation des différentes recettes.

3.1.1.2 Densité relative des grains solide des résidus

Les densités relatives des grains solides des deux résidus ont été déterminées à l'aide du pycnomètre à hélium AccuPyc 1330 de Micromeritic (Figure 3.1). Cet appareil détermine de manière automatique la masse volumique d'un matériau solide de manière très précise. Le dispositif expérimental comprend une cellule d'analyse de forme cylindrique située à son centre dans laquelle un cylindre porte-échantillon de volume (V_c) est logé. Le principe de fonctionnement de l'appareil consiste à soumettre un échantillon de masse connue (m) sous une pression (P_1) d'un volume de gaz d'hélium connu (V_1) qui diffuse à travers les vides de l'échantillon. Par la suite, le volume de gaz d'hélium est purgé de l'échantillon et recueilli dans une chambre d'expansion. Ce volume (V_2) permet de calculer la pression d'équilibre (P_2) dans l'échantillon. L'application de la loi de Mariotte sur les gaz parfaits rend possible le calcul précis du volume (V_e) de l'échantillon.

$$(P_1 - P_a)V_1 = (P_2 - P_a)V_2 \quad (3.3)$$

P_a étant la pression atmosphérique.

Connaissant le volume $V_e = V_c - V_1$, le volume de l'échantillon est déduit comme suit:

$$V_e = V_c - \frac{(P_2 - P_a)}{(P_1 - P_a)} V_2 \quad (3.4)$$

La masse (m) de l'échantillon étant connue, le rapport de celle-ci et du volume V_e ainsi déterminé permet le calcul direct de la masse volumique spécifique des grains solides ρ_s . La densité relative D_r (ou G_s) correspondant au rapport de la masse volumique spécifique de grains solides et de la masse volumique de l'eau ρ_w qui est en fait égale à 1.

$$\rho_s = \frac{m}{V_e} \Rightarrow D_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3.5)$$

Avant toute mesure, l'appareil doit être préalablement calibré selon une procédure précise. Cette opération d'une durée d'environ 45 minutes consiste à réaliser une mesure de la densité de deux billes d'acier dont la masse volumique est déjà connue (volume de l'ordre de $6,372084 \text{ cm}^3$).

Pour la réalisation des mesures, on détermine d'abord la masse à vide du porte-échantillon puis la masse de l'échantillon une fois placé dans le porte-échantillon cylindrique en utilisant une balance de précision (quatre chiffres après la virgule sont requis pour les pesées). Le cylindre (rempli au $\frac{2}{3}$ au moins) contenant la poudre d'échantillon est ensuite placé dans le pycnomètre qui est ensuite mis en marche.



Figure 3.1: Pycnomètre à hélium AccuPyc 1330 de Micromeritic

Les résultats des mesures sont présentés dans le Tableau 3.2. Les résidus de la mine LaRonde, plus riches en sulfures, ont une densité relative D_R nettement plus élevée que celle des résidus de la mine Doyon.

Tableau 3.2 : Densités relatives des résidus des mines LaRonde et Doyon

	Résidus de LaRonde	Résidus de Doyon
D_r	3,417	2,810

3.1.1.3 Minéralogie des résidus

La composition minéralogique des résidus est obtenue par la méthode de diffraction aux rayons X (DRX). Les diffractogrammes produits (Figure 3.2 et 3.3) sont ensuite interprétés par les logiciels TOPAS pour l'identification des minéraux et par la méthode de Rietveld pour leur quantification. Les résidus de la mine LaRonde sont plus riches en sulfures (pyrite), jusqu'à 27,12 %, ce qui leur confère une densité relative plus élevée de l'ordre de 3,42 contre un pourcentage en pyrite de 2,77 % pour les résidus de Doyon. Le minéral dominant des deux résidus est le quartz qui est représenté à un pourcentage de 51,72 % et 43,82 % respectivement, pour les résidus de Doyon et de LaRonde. Les proportions des autres minéraux constitutifs des résidus sont données sur les Figures 3.2 et 3.3.

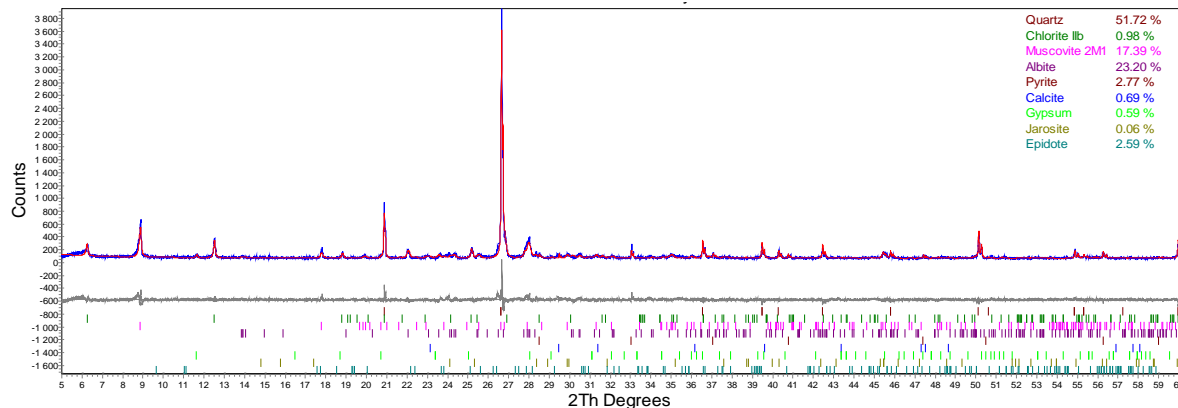


Figure 3.2 : Spectre de diffraction X des résidus de la mine Doyon

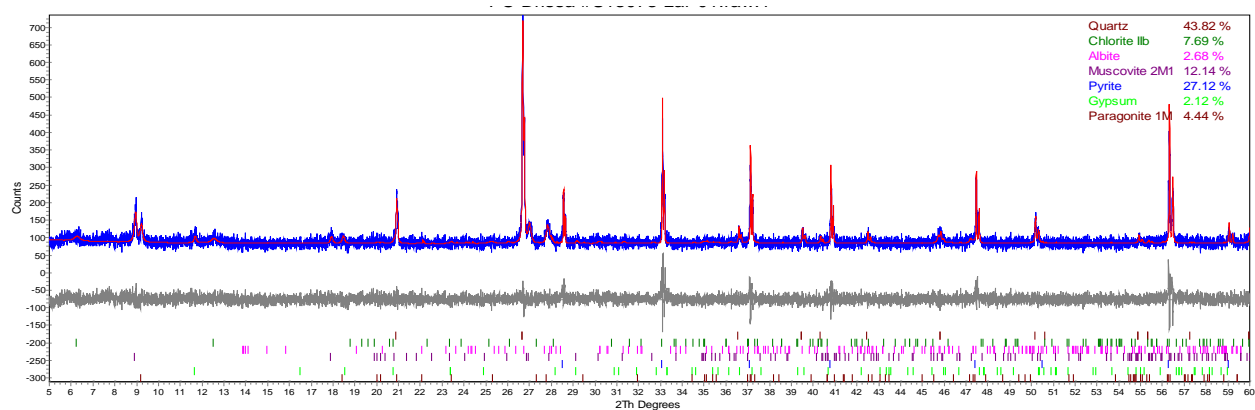


Figure 3.3 : Spectre de diffraction X des résidus de la mine LaRonde

3.1.1.4 Distribution granulométrique

L'analyse de la distribution granulométrique des résidus a été réalisée au moyen du granulomètre au laser Mastersizer 2000 de Malvern. Cet appareil permet de mesurer la distribution granulométrique d'un matériau granulaire à l'état poudreux dont les tailles des particules sont comprises entre $0,05 \mu\text{m}$ à $900 \mu\text{m}$. Le principe de mesure est fondé sur l'interaction entre un rayonnement laser incident et les particules du matériau. L'échantillon des résidus, introduit dans l'eau, est préalablement homogénéisé et dispersé au moyen d'ultrason ou d'agents dispersants pour éviter d'avoir des agglomérations de particules. Un système de mini pompe permet la circulation des particules de l'échantillon entre les lentilles traversées par le faisceau laser. Les déviations subies par le faisceau suite à l'interaction avec les particules permettent de mesurer les dimensions de chaque particule. Contrairement au tamisage qui donne des proportions massiques de chaque classe granulométrique, le granulomètre au laser produit une courbe granulométrique volumique représentative de toute la fraction fine. La Figure 3.4 présente les courbes granulométriques des deux types de résidus.

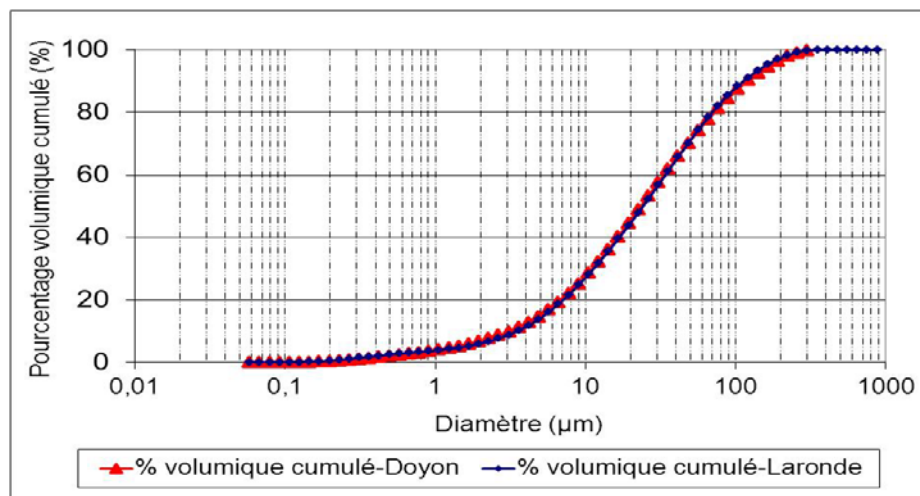


Figure 3.4 : Courbes granulométriques cumulées des résidus LaRonde et Doyon

Le Tableau 3.3 contient les valeurs des paramètres caractéristiques de la distribution granulométrique des deux types de résidus. Le D_{10} des résidus de LaRonde et de Doyon est respectivement de $3,5$ et de $3,12 \mu\text{m}$, tandis que le D_{60} est $34,17 \mu\text{m}$ et de $33,28 \mu\text{m}$ (paramètres

similaires). Le coefficient d'uniformité C_U se situe alors à 9,8 pour les résidus de LaRonde et à 10,6 pour les résidus de Doyon. On relève une grande proximité des caractéristiques granulométriques de ces deux types de résidus. La distribution granulométrique a une incidence directe sur le choix de l'ouverture de l'entrefer du rhéomètre car celui-ci doit être au moins égale à 10 fois la taille des grains les plus grossiers des résidus.

Tableau 3.3 : Données sur la granulométrie des résidus LaRonde et Doyon

Paramètres	LaRonde	Doyon
D_{10}	3,49	3,12
D_{30}	11,33	11,14
D_{50}	24,22	23,44
D_{60}	34,17	33,28
D_{80}	70,00	72,29
D_{90}	113,02	119,12
$C_U = D_{60}/D_{10}$	9,7	10,6
$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$	1,01	1,1

3.1.2 Description du rhéomètre AR 2000 et de la géométrie de mesure

Pour cette étude, c'est le rhéomètre AR 2000 de TA Instruments qui a été utilisé. Il s'agit d'un rhéomètre rotatif qui peut fonctionner soit en contrôlant la contrainte de cisaillement (τ), soit le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$). Dans ce travail, les mesures consistent à imposer une plage de contrainte de cisaillement et à enregistrer un certain nombre de variables dont le taux de cisaillement et la viscosité (η). Ce rhéomètre très sensible, dont le pilotage est assuré par un logiciel de contrôle, exige des réglages précis pour son bon fonctionnement. Ces réglages incluent le calibrage mensuel de l'inertie de l'instrument, le calibrage mensuel du système de roulement du moteur ("*bearing friction*"), l'inertie de la géométrie, la cartographie ("*mapping*") de la géométrie et la mise à zéro de l'entrefer ("*zero gap*"). Plusieurs types de géométries peuvent y être attachés pour effectuer les mesures. Les principales géométries sont : les plaques parallèles, le cône et la plaque, le cylindre concentrique et le moulinet ("*vane*").

Plaques parallèles : la géométrie des plaques parallèles, qui a été principalement utilisée dans ce projet, est constituée d'une plaque inférieure statique qui peut être lisse ou rugueuse appelée stator et d'une plaque supérieure mobile rugueuse appelée rotor. L'échantillon à cisailier est placé sur le stator et le rotor est abaissé jusqu'à l'ouverture de l'entrefer préalablement indiquée. Le couple de torsion (C) exercé par la résistance du fluide au mouvement est mesuré sur la plaque mobile (rotor) elle-même ou sur celle immobile (stator), dépendamment du design du rhéomètre. Dans le cas du rhéomètre AR 2000, le couple de torsion est mesuré sur le rotor. Pour effectuer des mesures avec cette géométrie, un accent particulier doit être mis sur le rayon du disque du rotor à utiliser. Les diamètres de rotor disponibles sont de 20 mm, 40 mm et 60 mm. Le choix du diamètre est dicté par l'ordre de grandeur de la viscosité du fluide en question. Plus le fluide est visqueux, plus petit doit être le diamètre du rotor comme présenté dans la Figure 3.5.

Les niveaux de contrainte de cisaillement peuvent être alors élevés. A l'opposé, plus la viscosité du fluide est faible, plus grand doit être le diamètre des disques pour assurer un cisaillement effectif de l'échantillon dans son intégralité.

De même, lorsque le taux de cisaillement à atteindre est très élevé, l'ouverture de l'entrefer doit être réduite pour éviter l'éjection de l'échantillon hors de la géométrie. Le seul diamètre utilisé dans cette étude est de 40 mm.

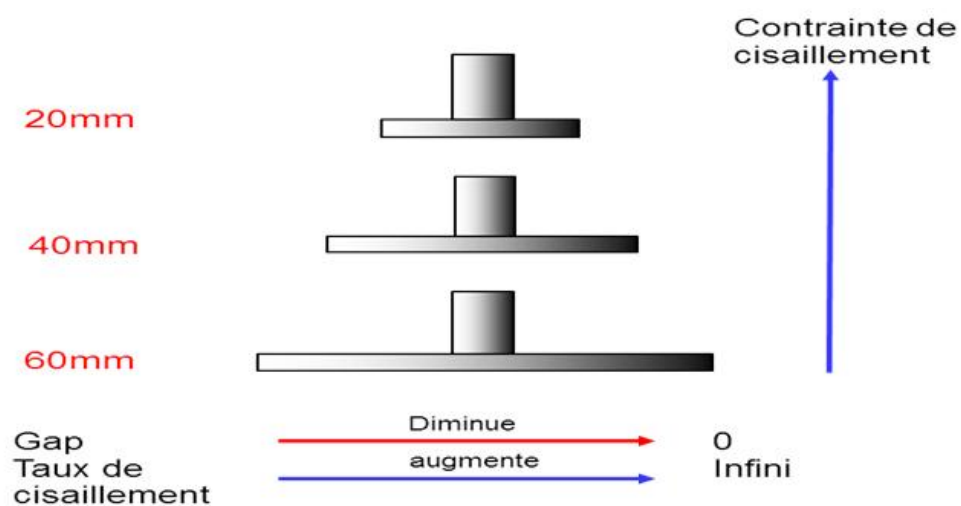


Figure 3.5 : Différentes dimensions de la géométrie de plaques parallèles (TA Instruments) : influence du gap sur le taux de cisaillement et du diamètre de la plaque sur la contrainte de cisaillement.

Moulinet ou «*vane*» : présenté à la Figure 3.6 a aussi été utilisé notamment pour les résidus à grande concentration en solides car ce dispositif semble plus apte avec ces matériaux. Le moulinet a un diamètre de 14 mm et le cylindre dans lequel l'échantillon est placé, a un diamètre de 15 mm.



Figure 3.6 : Géométrie de moulinet ou «*Vane*» (TA Instruments)

3.1.3 Description du viscosimètre ConTec

Comme cela a déjà été mentionné ci-dessus, une partie des mesures rhéologiques a été réalisée à l'Université de Sherbrooke à l'aide du viscosimètre ConTec fonctionnant selon un principe différent du rhéomètre AR 2000. C'est un appareil dont la géométrie de mesure est constituée de deux cylindres coaxiaux selon le modèle de Couette comme présenté à la Figure 2.13. Le cylindre externe a un diamètre de 12,4 cm tandis que le cylindre interne a un diamètre de 10 cm, ce qui donne un entrefer de 2,4 cm. Le cylindre interne, constitué de 2 éléments, a une hauteur de 9 cm contre 10,8 cm pour le cylindre externe. Lors du fonctionnement, le cylindre externe est mis en mouvement de rotation (rotor) selon des vitesses prédéfinies et le cylindre interne reste fixe (stator). Le fluide est ainsi mis en écoulement dans l'entrefer des deux cylindres et la force résistante à l'écoulement s'exerce sur le cylindre interne fixe permet de remonter à la courbe d'écoulement. Le modèle de Bingham est le modèle de lissage de la courbe force de résistance/vitesse. La viscosité (η) est alors calculée en utilisant la formule de Reiner-Riwlin telle

que donnée par l'équation 2.29. La Figure 3.7 présente le dispositif de mesure avec le viscosimètre ConTec. Dans cette figure, on peut observer a) le cylindre interne fixe avant la mesure puis b) l'introduction du cylindre interne dans les résidus placés dans le cylindre externe qui est mis en rotation et enfin c) le retrait du cylindre interne des résidus à la fin de la mesure.

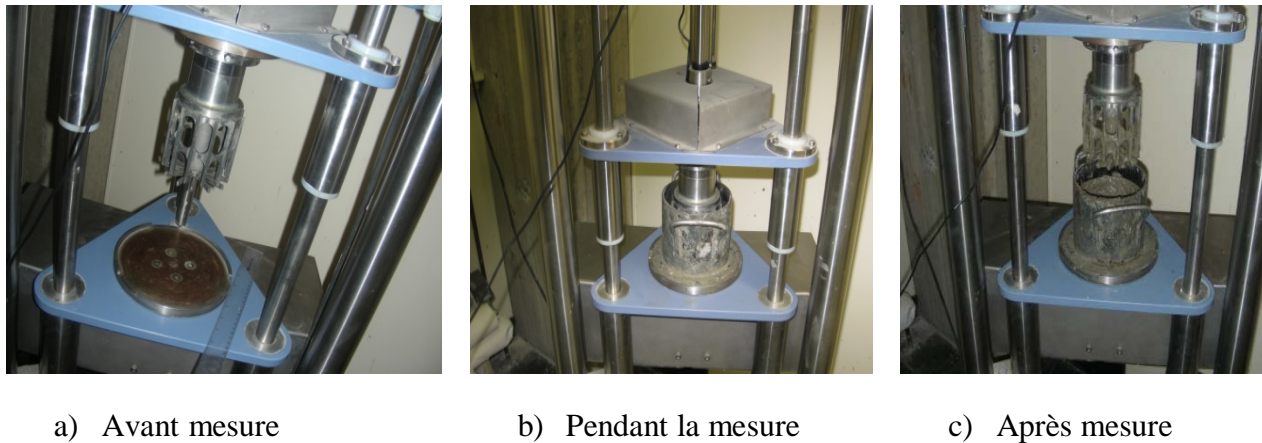


Figure 3.7: Viscosimètre ConTec du laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke

Deux procédures de mesure des paramètres rhéologiques ont été mises en œuvre avec le viscosimètre ConTec.

- Dans la procédure 1, le matériau est pré-cisailé à une vitesse de rotation du cylindre externe de 0,5 rad/s (ou rps) pendant 50 s avant l'enregistrement des données. Vingt points sont échantillonnés à des vitesses comprises entre 0,5 rps et 0,01 rps avec un intervalle de temps de 10 s pour chaque point.
- Dans la procédure 2, le pré-cisaillement dure 30 s et seulement 7 points sont échantillonnés à des vitesses de rotation du cylindre externe comprises entre 0,5 et 0,1 rps. Cette procédure vise à acquérir les données dans un intervalle de temps court pour minimiser la séparation des phases surtout pour les échantillons peu stables.

La hauteur de l'échantillon dans le cylindre externe doit être introduite dans les paramètres de l'appareil afin qu'elle ajuste les données de torque en fonction de la vitesse. Les hauteurs de 9 cm et 6 cm sont respectivement les valeurs par défaut dans les deux procédures.

3.1.4 Description des autres outils de mesure indirecte de paramètres rhéologiques

3.1.4.1 Mesure de l'affaissement au petit cône d'Abrams

Le petit cône d'Abrams présente une hauteur de 15,24 cm (6 pouces), un diamètre de base de 10,16 cm (4 pouces) et un diamètre supérieur de 5,08cm (2 pouces). La mesure de l'affaissement (ou « *slump test* ») est effectuée selon la procédure ASTM 143 consistant à son remplissage en trois couches, chacune des couches ayant subi un pilonnage de 25 coups d'une barre métallique de 1 cm de diamètre. Le petit cône est ensuite soulevé pour laisser le matériau s'affaisser sous son propre poids puis on mesure la hauteur de l'affaissement. La Figure 3.8 présente une photo d'une mesure avec le petit cône d'Abrams.



Figure 3.8 : Procédure de mesure de l'affaissement (*slump test*) au petit cône d'Abrams

3.1.4.2 Mesure de l'affaissement au mini-cône

L'utilisation d'un mini-cône pour la mesure de l'affaissement des résidus dans l'optique de le corrélérer avec le seuil de cisaillement a été investiguée. Le mini cône est utilisé pour évaluer

l'écoulement de coulis et mortier à travers leur étalement sur une plaque carrée plane. Le mini-cône utilisé pour la mesure a un diamètre de base de 38 mm, un diamètre supérieur de 19 mm et une hauteur de 57 mm. La Figure 3.9 présente les mini-cônes qui ont été utilisés dans le cadre de ce projet. La procédure de mesure consiste à poser le mini-cône au centre de la plaque carrée sur laquelle sont tracés les diagonales et les médianes du carré. Le test consiste à remplir le mini-cône avec le matériau et de la soulever pour laisser étaler l'échantillon jusqu'à l'arrêt de l'étalement. Par la suite, on mesure le diamètre de l'échantillon étalé sur les diagonales de la plaque. Plus ce diamètre est grand, plus le matériau est considéré fluide.

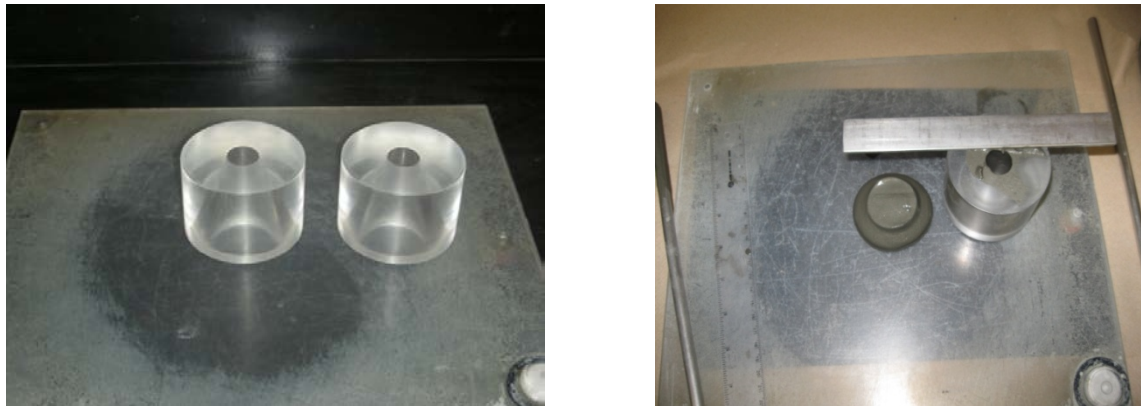


Figure 3.9 : Procédure de mesure de l'affaissement à l'aide du mini-cône d'écoulement

3.1.4.3 Entonnoir en V

L'entonnoir en « V » adapté pour les matériaux à écoulement continu est aussi utilisé pour caractériser l'écoulement des mortiers et coulis à l'état frais par la mesure du temps d'écoulement. Le principe de la mesure consiste à remplir l'entonnoir à ras bord par le matériau, puis à ouvrir la base de l'outil. Le temps nécessaire à l'écoulement complet du fluide est ensuite enregistré. La Figure 3.10 présente le prototype utilisé à l'Université de Sherbrooke.

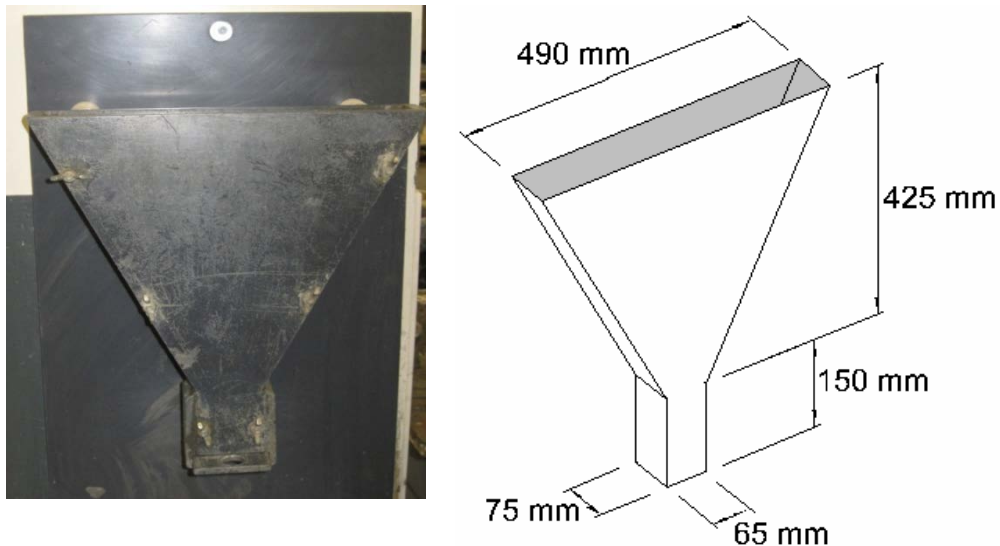


Figure 3.10 : L'outil en entonnoir ou « *V-funnel* » pour le temps d'écoulement

3.1.4.4 Procédure de mesure du ressuage statique

Le ressuage statique est un moyen qui permet de caractériser la stabilité des suspensions, c'est-à-dire, leur aptitude à sédimenter selon la loi de Stokes. Plus le matériau est stable, plus long sera le temps nécessaire pour qu'il se sépare en deux phases en condition statique. La caractérisation du ressuage réalisée dans cette étude a été faite selon la norme CSA-A233.

On procède en plaçant une certaine quantité de matériau (250 ml) dans une éprouvette graduée de même volume tel qu'indiqué sur la Figure 3.11. Ensuite, la hauteur d'eau surnageant est suivie et reportée en fonction du temps à 15 mn, 30 mn, 45 mn, 1 h, 2 h, 3h et à chaque heure jusqu'à l'obtention d'une hauteur constante. L'éprouvette est scellée à son ouverture à l'aide d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le taux de ressuage correspond au rapport de la hauteur enregistrée à chaque mesure sur la hauteur initiale de l'éprouvette.



Figure 3.11 : Éprouvette de 250 ml pour la mesure du ressuage statique

3.2 Méthodes et programme expérimental

Une vue synoptique de la démarche méthodologique qui a été adoptée dans le cadre de notre recherche est présentée sur le diagramme de la Figure 3.12. Il fait ressortir les différentes recettes qui ont fait l'objet d'analyse rhéologique et les différents tests qui ont été implémentés

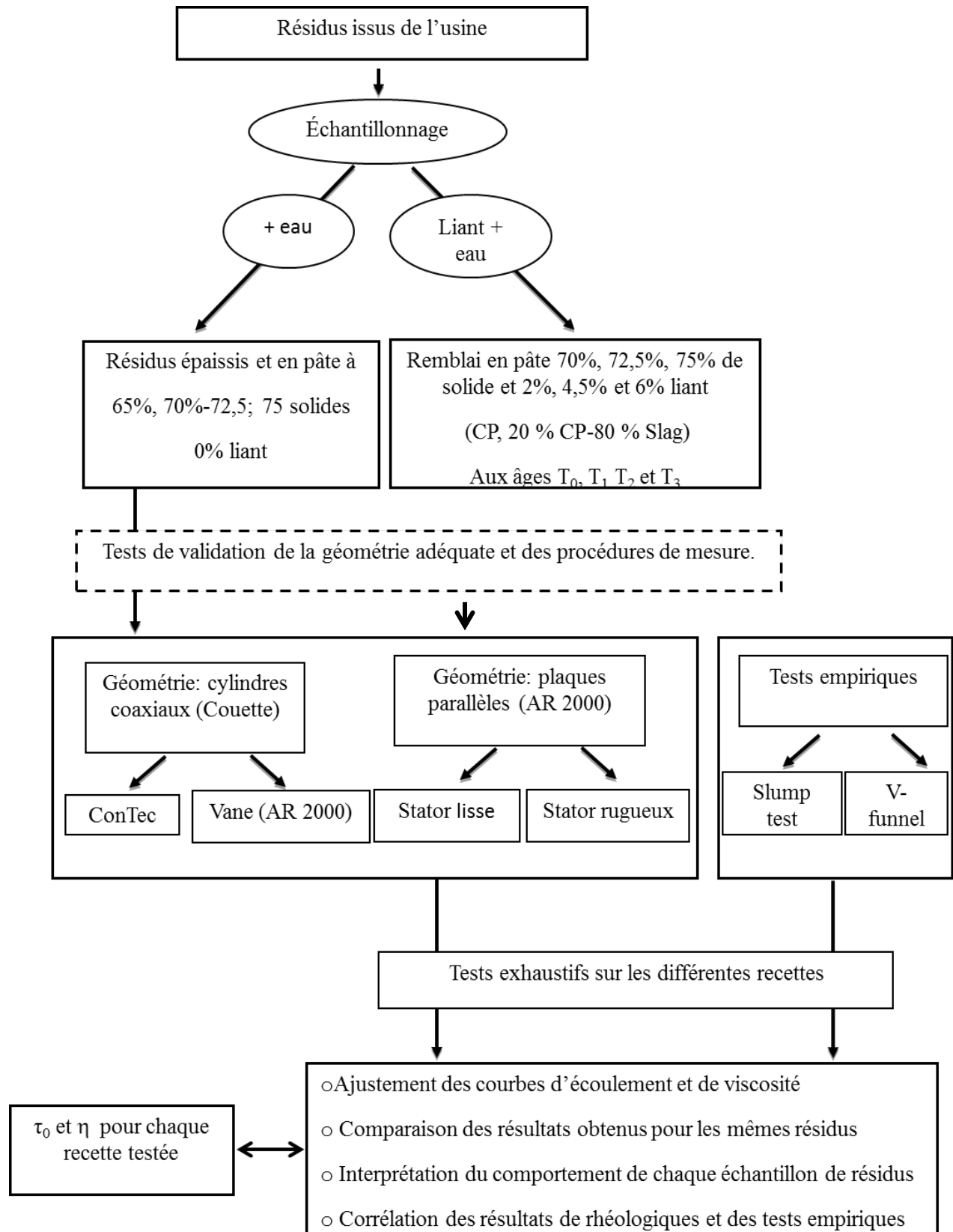


Figure 3.12 : Méthodologie générale.

3.2.1 Description des différentes méthodes de mesure

Les essais rhéologiques effectués avec le rhéomètre AR 2000 ont été conduits selon deux grands principes que sont le «mode écoulement» et le «mode dynamique». Ces deux modes permettent d'investiguer les paramètres rhéologiques en mettant en relation des variables spécifiques selon un ensemble de procédures. Le recours à un mode particulier de cisaillement est fonction des comportements spécifiques susceptibles d'être observés avec un matériau donné. C'est par exemple le cas du mode dynamique qui est plutôt dédié à l'évaluation des paramètres rhéologiques de fluides viscoélastiques. Il n'en demeure pas moins qu'il soit adapté à bien d'autres types de matériau tels que les remblais cimentés qui sont considérés comme des fluides viscoplastiques car en définitive tous les matériaux sont viscoélastiques dépendamment de leur temps de relaxation.

3.2.1.1 Mode écoulement

Le principe de mesure en «mode écoulement» est fondé sur la mise en écoulement de l'échantillon confiné entre les géométries du rhéomètre en imposant soit une contrainte de cisaillement ou un taux de cisaillement. Selon les variables mises en jeu et les modalités de leur variation, quatre procédures relevant de ce mode peuvent être distinguées. Il s'agit de la procédure du *peak hold step (PHS)*, du *continuous ramp flow (CRF)*, du *steady state step flow (SSSF)*, et *stepped flow step (SFS)*. La Figure 3.13 présente les principales procédures utilisées dans le cadre de ce mémoire. Sur cette figure, les croix rouges indiquent les points d'échantillonnage correspondant pour chaque procédure. Dans tous les cas, la contrainte de cisaillement a été imposée et le taux de cisaillement associé a été observé.

➤ «*Peak hold step*» consiste à fixer la valeur du taux de cisaillement à un niveau constant généralement faible et de suivre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps jusqu'à une valeur constante. Cette procédure vise à déterminer le temps de stabilisation de l'écoulement de l'échantillon (manuel de TA instrument) et le seuil de cisaillement selon Barnes et Nguyen (2001), Jewel et Fourie, 2002) et Kwak et al., (2005)

- «*Continuous Ramp Flow*»: la contrainte est appliquée continuellement au matériau selon une incrémentation régulière définie par l'intervalle de valeurs de contraintes choisies et le temps total de l'essai.
- «*Steady State Flow Step*»: on applique une contrainte de cisaillement constante, et les mesures sont réalisées lorsque le matériau atteint un état d'équilibre. Après le point d'équilibre, la contrainte de cisaillement est automatiquement augmentée.
- «*Stepped Flow Step* »: on applique des valeurs successives de contraintes de cisaillement pendant une période déterminée (palier), et les mesures de la contrainte sont enregistrées au milieu de chaque palier.

Sur les graphiques de la Figure 3.13, les croix indiquent l'enregistrement des mesures.

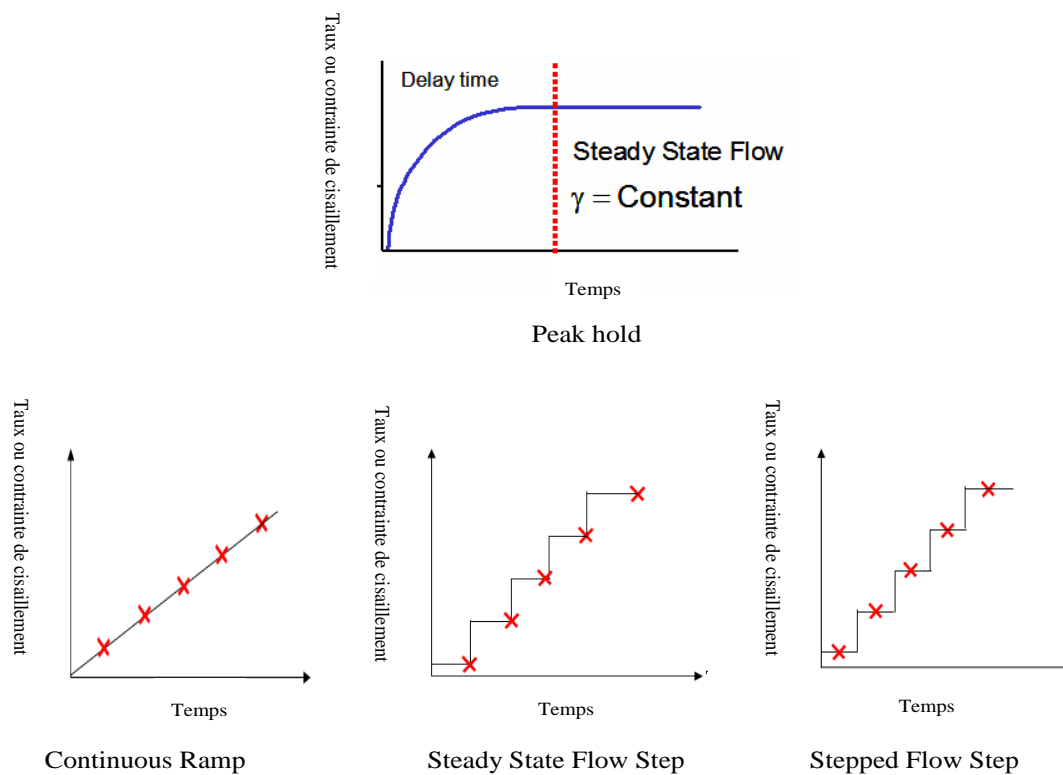


Figure 3.13 : Principales procédures du mode écoulement

Pour les procédures de *continuous ramp flow (CRF)*, de *steady state step flow (SSSF)*, et de *stepped flow step (SFS)*, les mesures peuvent se faire selon un accroissement des variables (mode ascendant ou chargement) et/ou selon une diminution des variables (mode descendant ou déchargement) tel qu'indiqué à la Figure 3.14.

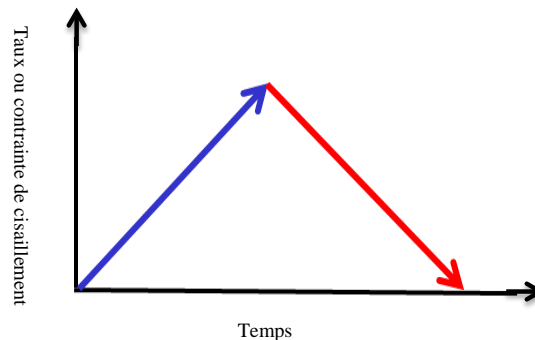


Figure 3.14: Procédure de mesure en mode «Up (ascendant) and Down (descendant)».

Le mode ascendant est souvent sous un régime transitoire contenant des artefacts liés à la mise en place de l'échantillon tandis que le mode descendant est plus stable et les courbes plus lisses sont ajustées aux modèles rhéologiques avec plus de précision. Ce sont ces dernières qui seront présentées dans cette étude. Les courbes obtenues à partir des procédures «*Up and Down*» sont utiles pour l'évaluation du comportement thixotropique.

3.2.1.2 Mode dynamique ou oscillatoire

Les essais en mode dynamique (oscillatoire) ont été réalisés dans le cadre de cette étude afin d'évaluer la capacité de ce mode à prévenir les phénomènes de perturbation souvent fréquents lors des tests rhéologiques sur des résidus densifiés (Diouf 2005). Pour ce faire, la méthodologie adoptée a consisté à effectuer les mesures en mode oscillatoire et en mode écoulement pour certains résidus, puis à procéder à une comparaison des résultats. En effet, selon la méthode de Cox-Merz (1958), la viscosité complexe obtenue par la méthode dynamique, qui est fonction de la rotation angulaire, et la viscosité en écoulement permanent, qui est fonction du taux de

cisaillement, sont identiques car superposables. Cette règle a été validée pour les fluides à seuil de cisaillement par Doraiswamy et al. (1991), Magnin et Mas (1996) et Chougnnet et al. (2007) dans certaines conditions. Son utilisation s'est limitée à la phase de calibrage du rhéomètre et n'a pas été systématique pour les tests sur les résidus en raison des temps de mesure souvent long.

➤ **Principe de la méthode oscillatoire**

Les mesures tests en mode dynamique consistent à soumettre un échantillon homogène de fluide à une contrainte de cisaillement sinusoïdale (τ) d'amplitude (τ_a) à une vitesse angulaire ($\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence). L'expression mathématique de la relation qui lie la contrainte oscillatoire et à la vitesse angulaire s'écrit (Ghezzehei et Or 2001):

$$\tau = \tau_a \sin \omega t \quad (3.6)$$

La déformation en cisaillement (γ) subie par le fluide, en réponse à la contrainte sinusoïdale, a aussi une forme sinusoïdale et peut présenter un certain déphasage angulaire (δ) par rapport à la contrainte sinusoïdale à l'origine de la déformation. Ce déphasage plus ou moins grand est caractéristique du comportement rhéologique du fluide en question. Les relations mathématiques de cette déformation résultante ainsi que du taux de cisaillement sont données par (Ghezzehei et Or 2001):

$$\gamma = \gamma_a \sin(\omega t + \delta) \quad (3.7)$$

$$\dot{\gamma} = \gamma_a \omega \cos(\omega t + \delta) \quad (3.8)$$

où γ_a est l'amplitude de la déformation, ω est la vitesse angulaire de rotation de la géométrie (rad/s), t est le temps, $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement, et δ est le déphasage angulaire qui s'établit entre les deux mouvements oscillatoires (contrainte et déformation).

La Figure 3.15 montre l'allure des fonctions oscillatoires pour les différents types de fluide. Sur cette figure, on relève que lorsque δ est égale à 0, cela signifie que la déformation du matériau est en phase avec le mouvement oscillatoire induit par la contrainte oscillatoire. Ce qui correspond au comportement d'un solide parfait. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsqu'il existe un déphasage total de 90 degrés entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement, cela signifie une déformation tardive du fluide après le mouvement induit par la contrainte de cisaillement de la géométrie; ce qui correspond à un comportement d'un fluide parfait. Le déphasage δ des fluides viscoélastiques compris entre 0 et 90 degrés permet donc d'obtenir une courbe entre les deux comportements énoncés. Les fluides réels sont plutôt viscoélastiques avec une dominance plus ou moins marquée d'un des deux comportements idéaux.

Tout matériau viscoélastique présente une caractéristique solide se manifestant par un coefficient dit module d'élasticité ou de stockage en cisaillement G' et un coefficient de fluidité dit module de perte de rigidité en cisaillement G'' qui caractérise la phase liquide du comportement. Pour le comportement élastique, on peut établir une relation entre les amplitudes des fonctions de contrainte et la réponse de déformation similaire à la loi de Hooke :

$$\tau_a = G^* \gamma_a \quad (3.9)$$

$$\text{avec } G^* = \sqrt{[(G')^2 + (iG'')^2]}$$

On peut également faire les mêmes transformations avec la fonction du taux de cisaillement de l'équation 3.6 et obtenir la relation de la viscosité pour un fluide parfait.

$$\tau_a = \eta^* \dot{\gamma}_a \Omega \quad (3.10)$$

À partir de cette relation, on peut définir une viscosité complexe qui s'écrit comme suit :

$$\eta^* = \sqrt{[(\eta')^2 + (i\eta'')^2]} \quad (3.11)$$

Finalement, les relations de G^* et de la viscosité η^* contiennent toute l'information sur le comportement d'un matériau et le déphasage δ donne la contribution de la contrainte et de la déformation dans un matériau viscoélastique.

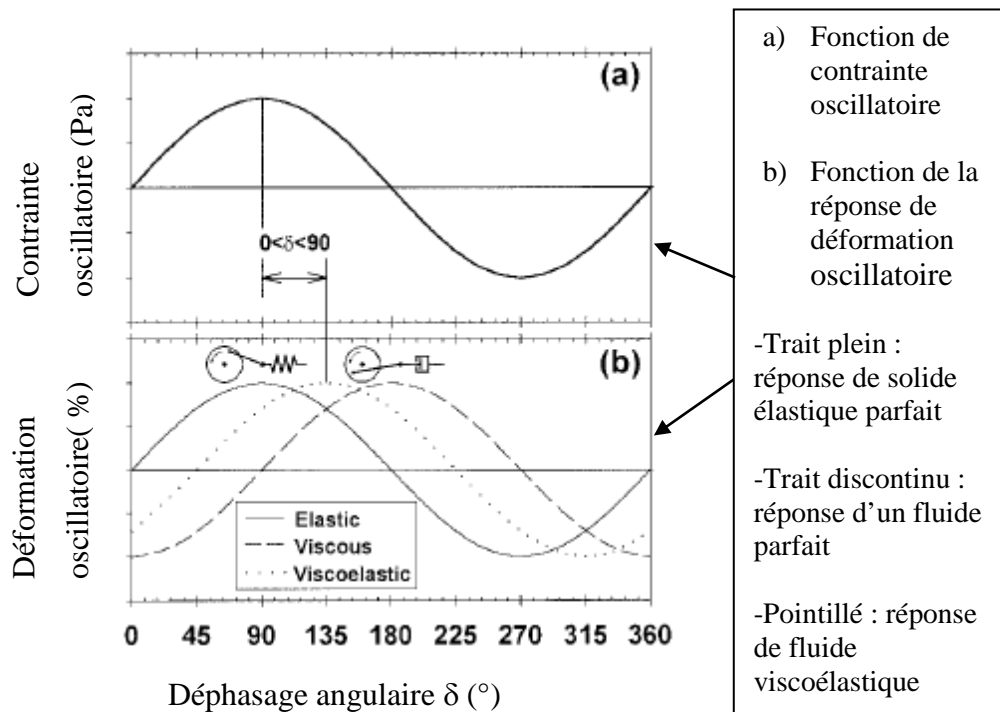


Figure 3.15 : Différents comportements de fluides soumis à des cisaillements oscillatoires (adapté de Ghezzehei et Or 2001).

➤ Principales procédures de mesures en mode dynamique

Avec le mode oscillatoire, on distingue plusieurs chemins de cisaillement en fonction des types de matériaux et selon leur structuration. Pour ce qui concerne cette étude, les procédures en mode dynamique qui ont été mises en œuvre sont le *time sweep*, le *stress/strain sweep* et le *frequency sweep*. Ces procédures seront décrites de manière plus détaillées dans les sections suivantes:

➤ Procédure dynamique de balayage du temps ou *Time sweep* : cette procédure consiste à suivre l'évolution de la contrainte ou la déformation en fonction du temps à une fréquence donnée. La Figure 3.16 montre de façon schématique la procédure du *time sweep* et le Tableau

3.4 contient les variables et les conditions de mise en œuvre de cette procédure. Elle permet alors de fixer le temps de stabilisation d'un échantillon après un pré cisaillement ou de suivre l'évolution de l'état de consistance (durcissement) d'un matériau au cours du temps.

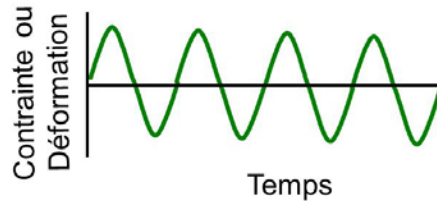


Figure 3.16 : Schéma de la procédure du *time sweep* (TA Instruments).

Tableau 3.4 : Conditions de mise en œuvre de la procédure de *time sweep*

Variable	Variables fixées	Conditions d'utilisation
Temps	Température fixe	Étude de la dépendance du comportement rhéologique en fonction du temps (Thixotropie);
	Fréquence fixe	
	Amplitude de la déformation ou de la contrainte fixe	Étude du temps de cure des matériaux; Étude de la stabilité contre la dégradation thermique; Étude de l'évaporation des solvants et/ou du séchage du matériau

- Procédure de *stress /strain sweep* : une fréquence est imposée au mouvement oscillatoire de la géométrie de mesure et on fait varier l'amplitude de la déformation ou de la contrainte de manière incrémentale tel que représentée à la Figure 3.17 et le Tableau 3.5. Il est recommandé de commencer avec les basses fréquences et les petites plages de contrainte avant de déterminer les valeurs adéquates.

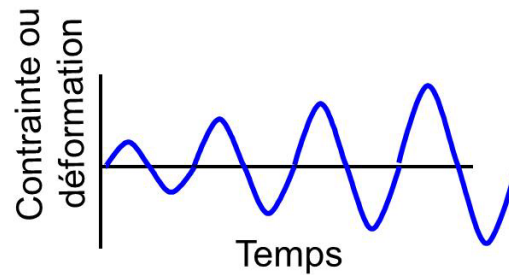


Figure 3.17 : Procédure de mesure en balayage de contrainte ou de déformation (*stress ou strain sweep*) (TA Instruments).

Tableau 3.5 : Condition de mise en œuvre de la procédure de balayage de contrainte ou de déformation (*stress or strain sweep*).

Variable	Variables fixées	Conditions d'utilisation
Amplitude de la contrainte de cisaillement oscillatoire	Température fixe	Détermination de la région linéaire
	Fréquence fixe	Détermination de la force de structuration du matériau/stabilité de la sédimentation
		Résilience

➤ Procédure de *frequency sweep* : Dans la procédure de balayage de fréquence illustrée par la Figure 3.18, on applique une amplitude de déformation ou de contrainte donnée et on fait varier la fréquence. La fréquence est alors faible au début et s'intensifie au fur et à mesure. Cette procédure vise à appréhender le comportement du fluide sur une plage de fréquence tel que spécifié dans le Tableau 3.6 au niveau des variables à fixer et celles à suivre.

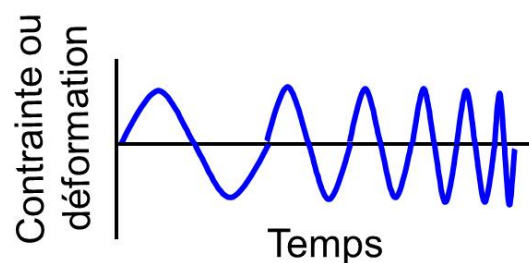


Figure 3.18 : Mode de cisaillement dans la procédure oscillatoire de *frequency sweep* (TA Instruments).

Tableau 3.6 : Condition de mise en œuvre de la procédure de balayage de fréquence (*frequency sweep*).

Variable	Constantes	Conditions d'utilisation
Fréquence	Amplitude de la contrainte ou de la déformation	Information sur la viscosité à 0 taux de cisaillement (seuil de cisaillement)
	Température	Pseudo-plasticité Détermination des propriétés aux hautes et basses valeurs du taux de cisaillement

➤ Protocole de tests rhéologiques sur un échantillon

Pour les mesures en mode dynamique, les étapes suivantes sont suivies :

- Réaliser un test en procédure de balayage de la déformation en fonction de temps (*time sweep*) pour se fixer sur le caractère de dépendance ou non du fluide au temps (thixotropie, anti-thixotropie, viscoélasticité etc.) du matériau. Pour ce faire, l'échantillon est directement soumis à un premier essai de balayage de temps sans conditionnement aucun, puis à un second essai suivant la même procédure, mais l'échantillon étant au préalable pré-cisaillé dans le but d'effacer toute histoire de cisaillement.

Exemple : on fixe la fréquence à 1 rad/s et la contrainte oscillatoire à 0,1 Pa ou le taux de déformation à 0,05%. On représente G' en fonction du temps

- Réaliser ensuite un test de déstructuration /structuration du matériau

Exemple : on pré-cisaillé le matériau à 100 1/s durant 60 s et on fixe la fréquence entre 1 et 3 rad/s, la contrainte à 0,1 Pa ou la déformation à 0,05% et on suit la déformation en fonction du temps.

Le pré-cisaillement vise à déstructurer le matériau. Si le matériau est un fluide indépendant du temps, la contrainte ou la déformation doit demeurer constante au cours du temps. Par contre, si la contrainte augmente ou diminue au cours de temps après le pré-cisaillement, on a respectivement une restructuration ou la poursuite de la déstructuration du matériau. Ce dernier essai permet de suivre l'évolution des modules G' et G'' en fonction du temps jusqu'à la stabilisation de G' correspondant à l'état de base du matériau, et ce temps correspondrait à la

durée de conditionnement à observer après chaque pré-cisaillement avant de procéder à la mesure suivante. Une fois le temps de conditionnement déterminé, les mesures en procédure de balayage de fréquence peuvent ensuite être menées afin de déterminer la plage de fréquences compatibles avec les mesures et l'évolution des paramètres en fonction de la fréquence. On peut aussi procéder à des essais en balayage de contrainte ou de déformation en choisissant une faible fréquence, puis en reprenant à des fréquences de plus en plus grande jusqu'à la fréquence adéquate. Ces mesures donnent des informations sur le seuil de cisaillement et la viscosité. L'influence de la fréquence dans les mesures se traduit par une réduction de la zone linéaire et les valeurs de G' de plus en plus grandes lorsque les fréquences de mesure sont élevées. Les grandes fréquences ont tendance à fluidifier rapidement le matériau donc à réduire la région linéaire avec un module d'élasticité élevé tandis que les faibles fréquences entraînent une fluidification plus longue, donc une zone linéaire plus grande à un module d'élasticité relativement faible. Pour les fluides très structurés avec de grandes régions linéaires comme les polymères, les grandes fréquences sont indiquées pour atteindre rapidement la fin de la région linéaire qui permet la détermination du seuil de cisaillement. On représente G' en fonction du temps comme montré à la Figure 3.19 et on note la durée de la restructuration correspondant à la stabilisation de G' .

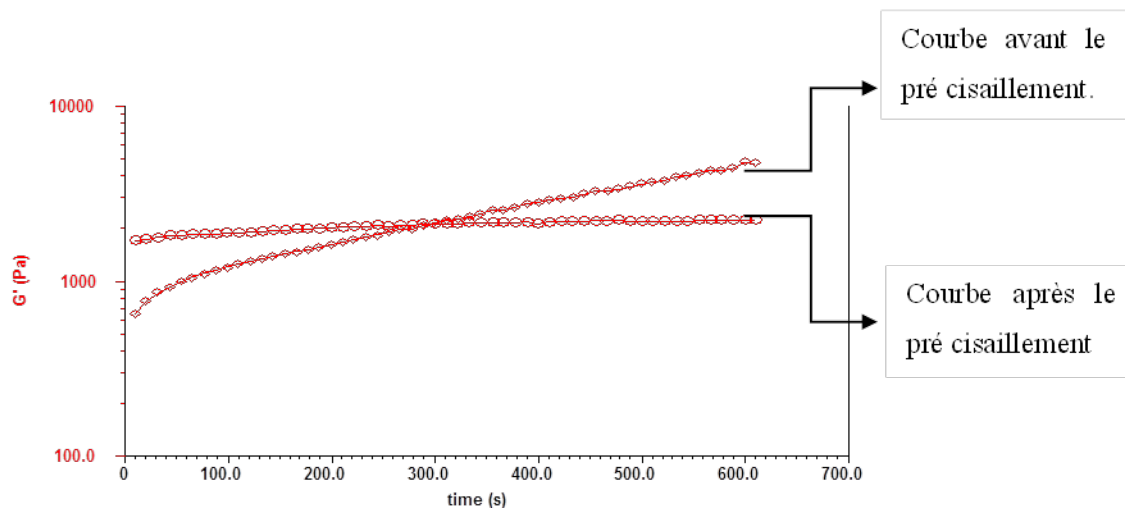


Figure 3.19 : Exemple de résultats sur un échantillon d'encre (adapté de Rheology training course, TA Instruments)

On effectue un test de balayage de contrainte ou de déformation pour déterminer la zone linéaire de viscoélasticité.

➤ Méthode d'interprétation

Dans le cas de l'utilisation de cette procédure pour la détermination du comportement d'un fluide, l'interprétation se fait à partir des graphes présentant l'évolution des modules de stockage G' et de perte G'' qui sont respectivement caractéristiques des comportements élastique et visqueux tel que présenté à la Figure 3.20. Dans cette figure il est indiqué l'allure des courbes de la contrainte oscillatoire et celle de la déformation oscillatoire induite. Dans la région linéaire correspondant à un comportement élastique, les deux courbes sont en phase tandis qu'il apparaît un certain déphasage entre les deux courbes dans la région d'écoulement permanent. Le logiciel d'analyse utilisé pour l'interprétation des résultats permet de trouver l'intersection de la partie élastique et celle visqueuse, ce qui permet d'accéder au seuil de cisaillement (τ_0) indiqué par la flèche verticale sur la Figure 3.20. La représentation de la viscosité complexe en fonction de la contrainte oscillatoire donne alors l'évolution de la viscosité dynamique en fonction de l'amplitude de la contrainte de cisaillement.

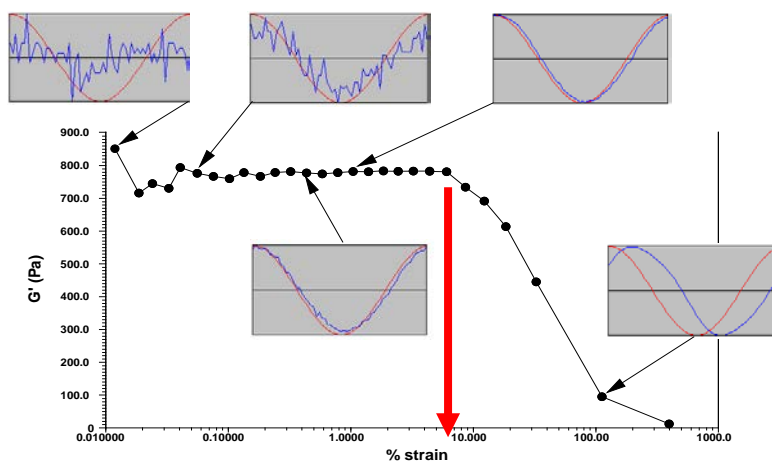


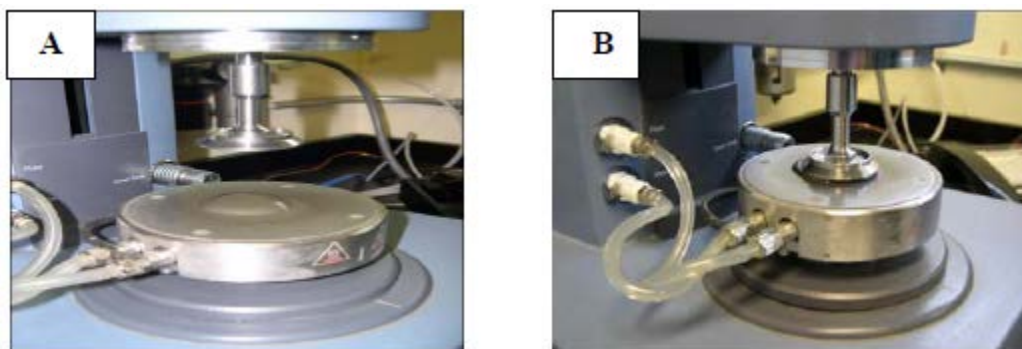
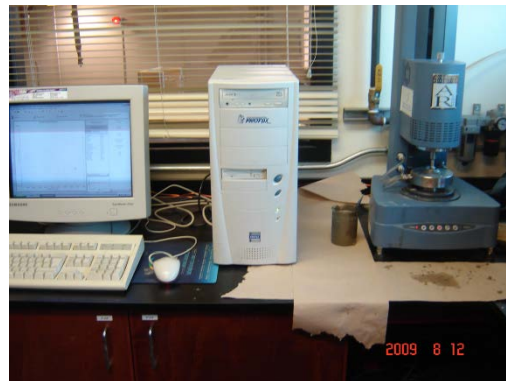
Figure 3.20: Exemple de courbe en mode oscillatoire pour un fluide visco-élastique et forme des ondes suivant le comportement du fluide (adapté de Rheology training course, TA Instruments).

3.2.1.3 Principales étapes du protocole de mesure avec le rhéomètre AR 2000

La mise en œuvre des mesures avec le rhéomètre AR 2000 se fait par étapes successives pour assurer l'obtention de résultats correctes.

- Procéder aux différents réglages de l'appareil incluant la mise à zéro de l'entrefer des plaques ou gap, le calibrage de l'inertie de la tige de rotation à vide sans la géométrie de mesure et ensuite avec la géométrie de mesure, le calibrage du frottement dû à la rotation de la tige verticale de mesure et la cartographie (mapping) de la géométrie.
- Introduire les valeurs des paramètres de la géométrie de mesure, notamment le diamètre du disque dans le cas des plaques parallèles ou le diamètre du cylindre dans le cas de la géométrie du moulinet. C'est également à cette étape que l'ouverture de l'entrefer de mesure est fixée.
- Choisir la procédure de mesure (mode écoulement ou dynamique). Cette étape consiste à fixer les plages de contrainte de cisaillement ou du taux de cisaillement, le temps d'échantillonnage des points, le nombre de points à échantillonner et la température à laquelle la mesure doit se faire.
- Mettre en place l'échantillon sur la plaque inférieure et abaisser la géométrie de mesure jusqu'à l'ouverture de l'entrefer indiquée et après quoi la mesure peut être lancée. La Figure 3.21 présente les différentes étapes de la mise en place de l'échantillon avec la géométrie des plaques parallèles.

Le mode dynamique n'a pas fait l'objet d'une utilisation systématique dans ce projet à cause du temps souvent long de sa mise en œuvre, mais a été utilisé de manière ponctuelle pour certaines recettes, notamment celle à fort pourcentage solide pour confirmer certains résultats.



A) Mise en place de l'échantillon et B) début des mesures

Figure 3.21 : Les différentes étapes de l'essai avec le disque parallèle du rhéomètre AR 2000.

3.2.1.4 Méthodes de traitement des résultats et d'ajustement des rhéogrammes

Après la réalisation des mesures, les paramètres rhéologiques sont évalués sur la base des courbes d'écoulement (contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement) et les courbes de viscosité (Viscosité en fonction du taux de cisaillement) par l'utilisation du logiciel d'analyse des données de TA Instrument qui accompagne le logiciel de pilotage du rhéomètre AR 2000. Cependant, les courbes expérimentales ascendante et descendante brutes ne peuvent être interprétées dans leur intégralité car l'erreur standard y est souvent très élevée. Le logiciel d'analyse des résultats «*Rheological data analysis advantage*» présente plusieurs options de traitement permettant de disposer de données fiables. Les courbes originales sont alors corrigées par une série de traitement comprenant quatre étapes successives qui sont :

- *la correction de la contrainte* qui consiste à corriger le surplus de contrainte dû à l'effet de bord des plaques parallèles. En effet, les plaques parallèles ont tendance à générer une contrainte normale plus élevée que dans le cas de la géométrie du cône et plaque en raison de la forme de l'effet de bord. Cette correction entraîne une légère baisse de la courbe d'écoulement comme indiqué sur la Figure 3.22.

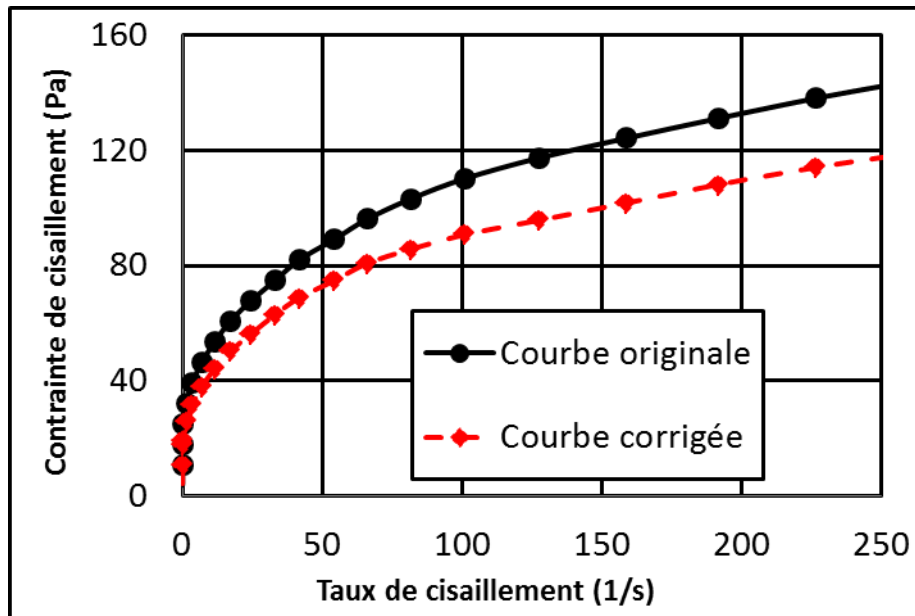


Figure 3.22 : Résultat de la correction sur la contrainte.

- *Traitement par la fonction « Merge »* : lorsqu'on dispose de plusieurs courbes d'écoulement obtenues selon des modes de chargement différents, on peut effectuer une fusion de ces courbes à l'aide de la fonction « Merge ». Cette action permet d'obtenir une courbe unique sur laquelle les traitements ultérieurs peuvent s'appliquer. La fusion peut se faire sur la moyenne des points dans un pourcentage donné. La courbe issue de la fusion de plusieurs courbes d'écoulement selon trois modes de chargement différents peut comporter le plus souvent un grand nombre de points et est souvent en dents de scie. Il faut alors procéder à un lissage de cette courbe à l'aide de la fonction « Smooth ». Après ce lissage, la courbe comporte toujours beaucoup de points qui doivent être réduits.

- *Traitement sur la réduction du nombre de points*: Le traitement sur la réduction du nombre de points peut se faire selon deux modalités à savoir réduire en prenant la moyenne ou un seul point par groupe de deux points successifs ou plus. Cela réduit le nombre de points constituant la courbe d'écoulement et permet ainsi de réduire le nombre de points erronés comme indiqué sur la Figure 3.23.

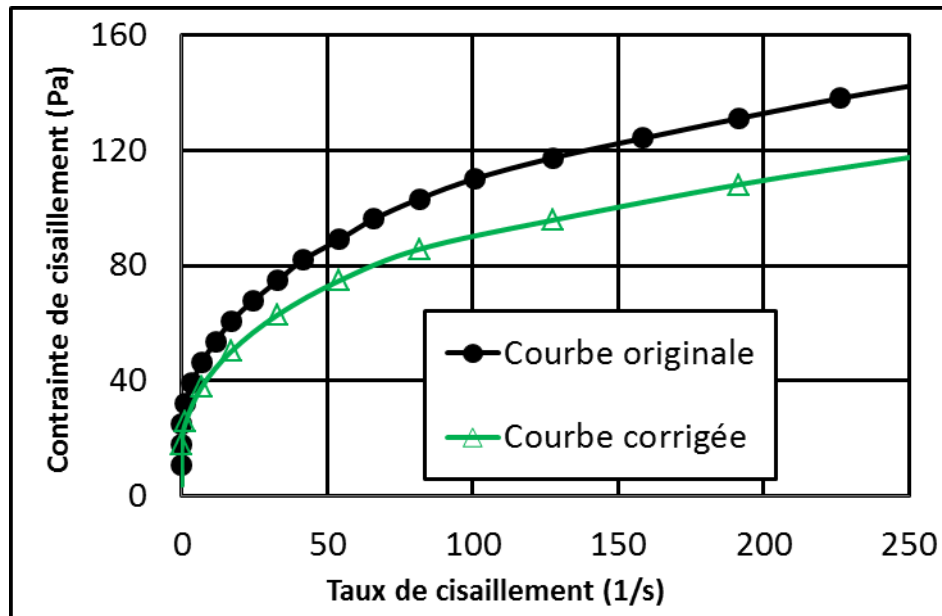


Figure 3.23 : Résultats de la correction sur la réduction de nombre de points.

- *Lissage par application des modèles d'ajustement* : on peut procéder à un dernier traitement qui consiste à lisser la courbe résultante si nécessaire. Ce lissage consiste à arranger les points excentrés invalides qui ne permettent pas un ajustement adéquat de la courbe d'écoulement. Ce lissage aboutit à une courbe définitive de la Figure 3.24 sur laquelle les modèles peuvent être appliqués afin de déterminer les paramètres rhéologiques. L'option de meilleur modèle d'ajustement (*best fitting model*) disponible dans le logiciel, a été appliquée sur les courbes d'écoulement. Cette option permet au logiciel de générer les paramètres du modèle par ajustement, c'est-à-dire, celui qui est le plus proche possible des données expérimentales basées sur l'erreur standard tel que présenté sur la Figure 3.24.

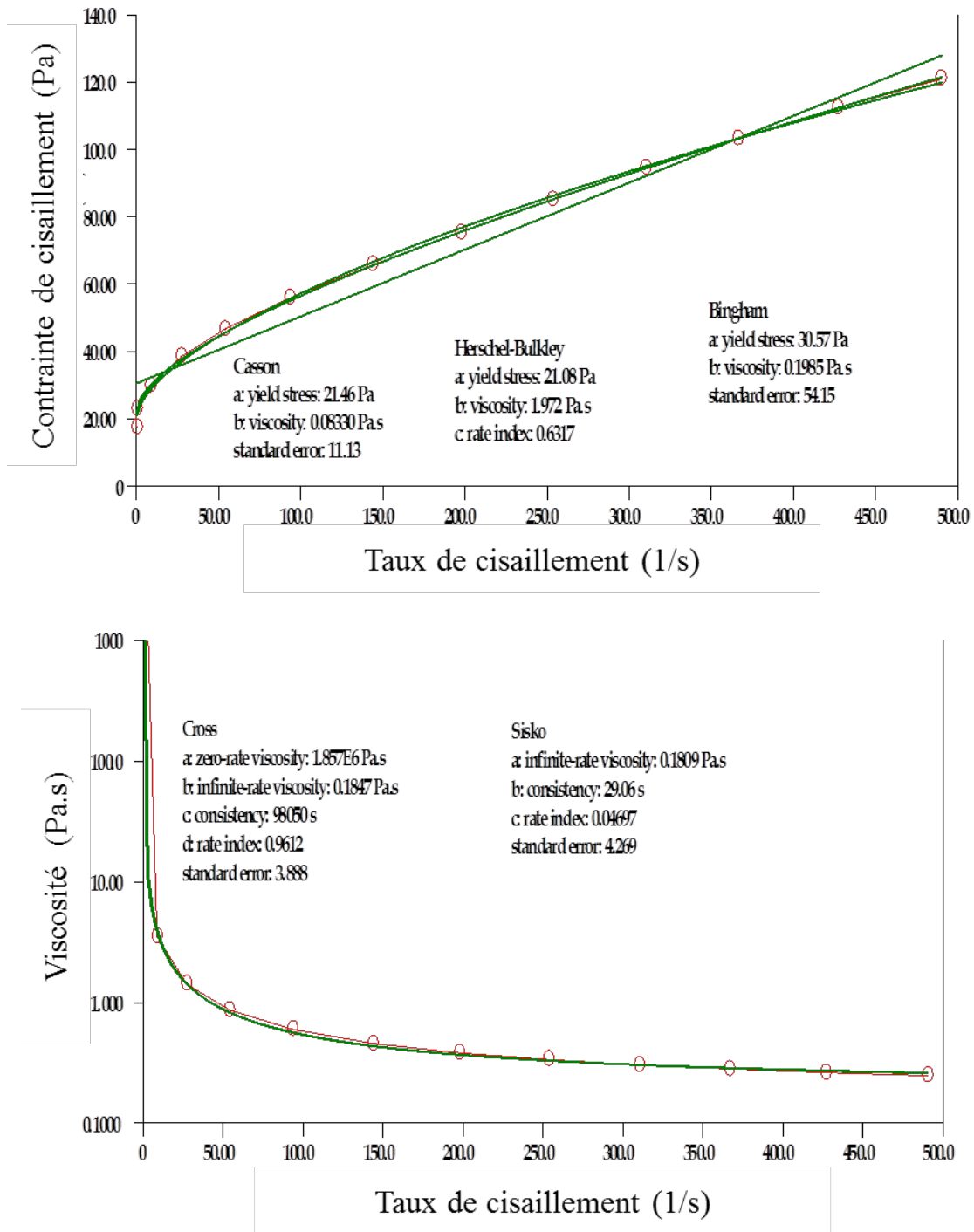


Figure 3.24 : Traitement de lissage et ajustement des courbes d'écoulement en a) selon les modèles de Herschel Bulkley, Casson, Bingham et de viscosité b) selon les modèles de Sisko et Cross.

L'erreur standard est calculée par le logiciel selon la méthode des moindres carrés dont la formule est donnée par l'équation 3.12.

$$\text{Erreur standard (\%)} = \left[\frac{\left(\frac{\sum (x_m - x_c)^2}{(N-2)} \right)^{1/2}}{\text{range}} \times 1000 \right] \quad (3.12)$$

x_m est la valeur du point obtenue expérimentalement.

x_c est la valeur du point calculé par l'équation du modèle utilisé.

N correspond au nombre total de points mesurés.

Range = Valeur maximale mesurée – la valeur minimale mesurée

L'erreur standard est jugée acceptable lorsqu'elle est inférieure à 20 selon le manuel de TA instrument.

Le modèle d'ajustement de Herschell-Bulkley (équation 2.13) a été le modèle le plus souvent en adéquation avec les rhéogrammes des résidus et des remblais miniers étudiés. Les deux modèles les plus proches du meilleur modèle sont également utilisés à des fins de comparaison. Il s'agit des modèles de Casson (cas particulier de l'équation 2.14) et celui de Bingham (équation 2.12). L'ajustement des courbes de viscosité a utilisé les modèles de Sisko et de Cross dont les expressions mathématiques sont données par les équations 3.13 (modèle de Sisko) et 3.14 (modèle de Cross).

$$\eta = \eta_\infty + K_S \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.13)$$

$$\eta = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{1 + k \dot{\gamma}^m} \quad (3.14)$$

où η_0 et η_∞ sont les viscosités du matériau au taux de cisaillement de 0 et à l'infini (plus fort taux de cisaillement) et exprimées en Pa.s.

K_S et k respectivement en Pa.s^n et Pa.s correspondent à la consistance et m et n sont des nombres adimensionnels.

3.2.2 Contrôle de qualité des mesures au rhéomètre

Cette phase de contrôle de qualité a été menée en deux étapes. La première étape a porté sur le calibrage du rhéomètre avec des fluides standards newtoniens et non newtonien et la deuxième étape a consisté en l'utilisation d'un deuxième rhéomètre dont la géométrie et le principe de fonctionnement sont totalement différents du rhéomètre AR 2000 pour la validation des procédures de mesure.

3.2.2.1 Calibrage à l'aide de fluides standards

Le calibrage du rhéomètre par l'usage de fluides standards est une étape essentielle dans l'assurance qualité des tests rhéologiques car elle garantit non seulement le bon fonctionnement de l'appareil mais aussi la validité des procédures de mesure adoptées et la confiance accordée aux données obtenues dans une mesure rhéologique. Il est recommandé de procéder à cette opération de calibration au fluide selon une fréquence mensuelle pour évaluer les performances et la précision du rhéomètre. Deux types de fluides standards newtonien et non-newtonien ont été requis pour les tests de calibrage. Le calibrage avec les fluides standards newtoniens a porté sur les produits de la série de fluide RT notamment le RT 60000 et le RT 12500 obtenus auprès de la compagnie Cannon® Instruments Company Inc., tandis que le fluide standard non newtonien utilisé dans cette étude est le NNTF1 produit par le Bureau fédéral de Techniques Physiques (Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de la république fédérale d'Allemagne.

Les essais ont été réalisés selon les procédures décrites plus haut, en utilisant dans un premier temps la géométrie de plaque parallèle pour des ouvertures d'entrefer de 1500 μ m et 2000 μ m avec les plaques inférieures lisse et rugueuse sur un échantillon de volume correspondant à l'ouverture de l'entrefer des plaques parallèles. Une seconde phase a fait recours à la géométrie du moulinet pour effectuer le même calibrage à des fins de comparaison. L'entrefer de 4000 μ m a été retenu et un échantillon d'un volume approximatif de 28,9 cm³ a été placé dans le cylindre.

Les fluides newtoniens RT 60000 et RT12500 ont respectivement une viscosité de 60 et 12,5 Pa.s à la température de 20°C tel que montré par l'ajustement des courbes à l'annexe 1.

Le fluide non-newtonien utilisé (NNTF1) a une courbe d'écoulement caractéristique présentant une évolution en deux temps selon la plage de taux de cisaillement imposée. Selon les prescriptions du fabricant du fluide standard, pour les valeurs du taux de cisaillement compris entre 1 et 10 s⁻¹, le comportement du fluide est Binghamien selon l'équation (cf annexes 2) :

$$\tau = 10,7 + 0,053\dot{\gamma} \quad (3.15)$$

Pour des valeurs du taux de cisaillement supérieures à 10 s⁻¹ la courbe d'écoulement obéit à une loi de puissance suivant la relation d'Ostwald De Walae formulée comme suit :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (3.16)$$

avec $K = 3,6419$ et $n = 0,4882$

Il est impératif de réaliser les essais en mode d'écoulement stable tel que prescrit par le fabricant. Pour cela les essais de calibrage du rhéomètre avec les fluides ont été réalisés selon les procédures *steady state step flow* (SSSF), *continuous ramp flow* (CRF) et *stepped flow step* (SFS) en faisant varier soit le taux de cisaillement soit la contrainte de cisaillement (à un intervalle de temps permettant d'atteindre la stabilité soit au moins 10 secondes).

Ces échantillons ont été soumis dans le cas des deux géométries à un cisaillement dans une plage de contrainte de cisaillement de 0 à 90 Pa puis à un taux de cisaillement de 0 à 600 s⁻¹ pour un temps de mesure de 10 s par point échantillonné. La température a été maintenue constante à 20°C pendant tous les essais.

Les procédures oscillatoires de *frequency sweep* et *stress sweep step* ont été appliquée à l'échantillon du fluide standard non-newtonien (NNTF1). La courbe de G' en fonction de la fréquence a permis de choisir certaines fréquences pour réaliser des essais de *stress sweep step*. En imposant une contrainte oscillatoire variant de 0 à 120 Pa et en fixant la fréquence à 5, 8, 10, 20 et 62,83 rad/s dans la zone de fréquence linéaire, cela a conduit à l'obtention de plusieurs courbes dont l'interprétation a permis de comparer les résultats dynamiques avec ceux obtenus en mode écoulement.

3.2.2.2 Validation des procédures de mesure par comparaison des résultats de AR 2000 et ConTec

Il est également recommandé dans la littérature de procéder à des mesures contradictoires sur d'autres types de géométrie pour s'assurer de s'affranchir des effets perturbateurs (Coussot et Ancey, 1999). Il a alors été entrepris de réaliser certains tests sur le viscosimètre ConTec utilisé au Laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke pour caractériser le comportement rhéologique de mortier et coulis. Des spécimens d'un volume de 3 litres de résidus densifiés (résidus simplement épaissis et remblais miniers) ont été élaborés avec les résidus de la mine Doyon au pourcentage de 70%S et 0 et 4,5% de liant selon des procédures aussi identiques que possibles que les conditions de mesures avec le rhéomètre AR 2000. Les résultats obtenus sont sous forme de tableau présentant le Couple (C) (en Pa) en fonction de la vitesse de rotation du cylindre externe (Ω) en radian par seconde (rps). Les courbes d'écoulement ont été par ailleurs tracées en calculant la contrainte de cisaillement qui est reliée au couple (C) par la relation 2.27 et le taux de cisaillement qui est relié à la vitesse par la relation 2.28 (Feys et al, 2007).

Suite à cette transformation, les données (contrainte de cisaillement fonction du taux de cisaillement) sont exportées dans le logiciel d'analyse des données rhéologiques pour générer les courbes d'écoulement. Les courbes d'écoulement obtenues par le rhéomètre AR 2000 et le ConTec pour les mêmes spécimens ont été ensuite traitées de manière identique sur la même plage de taux de cisaillement (autour de 50 s^{-1}) avant d'être ajustées par les mêmes modèles (Herschell Bulkley, Casson et Bingham). Pour chacun des échantillons étudiés et pour un modèle donné, les paramètres générés par différents modèles d'ajustement à partir des courbes d'AR 2000 sont comparés avec ceux des courbes du ConTec.

3.2.3 Préparation des recettes

Les recettes utilisées dans cette étude ont été préparées à partir des résidus dont les caractéristiques sont présentées dans la section 3.1.1 à différents pourcentages de solides et de liants et à différents temps de cure et présentées dans le

Tableau 3.9. Pour obtenir un mélange avec un pourcentage solide donné, il est fait recours à des paramètres de base à déterminer et qui serviront dans les calculs. Ces données incluent la quantité d'eau à ajouter ou à extraire pour atteindre le pourcentage solide désiré du mélange en tenant compte de l'eau contenu dans le résidu humide initial et la masse de résidu humide à échantillonner. Les relations qui permettent d'accéder à ces paramètres reviennent à celles qui suivent toutes démonstrations faites pour un mélange de pourcentage de solides C_w et de pourcentage liant B_w . La teneur en eau finale de ce remblai w_{fin} sera obtenue à partir de la relation suivante :

$$w_{fin} = \frac{1}{C_w} - 1 = \frac{100}{C_w \%} - 1 \quad (3.17)$$

La masse humide finale (M_{hfin}) du remblai revient à

$$M_{hfin} = (M_{si} + M_{wi}) + B_w \times M_{si} + M_{waj} = M_{si}(1 + B_w) + M_{wi} + M_{waj} \quad (3.18)$$

où:

M_{hfin} = masse humide finale du mélange de remblai;

M_{hi} = masse humide initiale du résidu;

M_{si} = masse de résidu sec;

B_w = pourcentage du liant;

M_{waj} = masse d'eau à ajouter.

La masse humide initiale M_{hi} est donnée par la relation 3.19 et la teneur en eau massique initial par l'équation 3.20.

$$M_{hi} = M_{wi} + M_{si} \quad (3.19)$$

$$w_i = \frac{M_{wi}}{M_{si}} \quad (3.20)$$

w_i est la teneur en eau initiale du résidu

La teneur en eau initiale (w_i), la masse humide initiale (M_{hi}) et la masse solide initiale (M_{si}) sont reliés par la relation 3.21

$$M_{si} = \frac{M_{hi}}{1 + w_i} \quad (3.21)$$

En combinant les équations (3.20) dans (3.21) on obtient

$$M_{wi} = \frac{w_i}{1 + w_i} \times M_{hi} \quad (3.22)$$

En utilisant les relations de M_{si} et de M_{wi} définies respectivement aux équations 3.21 et 3.22, on peut exprimer l'équation 3.17 de la teneur en eau finale comme suit :

$$w_{fin} = \frac{1}{C_w} - 1 = \frac{M_{wi} + M_{waj}}{M_{si}(1 + B_w)} = \frac{\frac{w_i \times M_{hi}}{1 + w_i} + M_{waj}}{\frac{M_{hi}}{1 + w_i}(1 + B_w)} \quad (3.23)$$

De cette équation, on déduit l'expression de la masse d'eau à ajouter (M_{waj}) par :

$$M_{waj} = \frac{w_{fin}(1 + B_w) - w_i}{1 + w_i} \times M_{hi} \quad (3.24)$$

La masse humique finale ($M_{hfin} = M_{hi} + M_{liant} + M_{waj}$ où M_{liant} est la masse du liant) devient:

$$M_{hfin} = M_{hi} + B_w \times \frac{M_{hi}}{1 + w_i} + \frac{w_{fin}(1 + B_w) - w_i}{1 + w_i} \times M_{hi} = M_{hi} \left(1 + \frac{B_w}{1 + w_i} + \frac{w_{fin}(1 + B_w) - w_i}{1 + w_i} \right) \quad (3.25)$$

Si on connaît la masse humide finale (M_{hfin}) requise, on peut également écrire la masse humide initiale comme suit :

$$M_{hi} = \frac{(1 + w_i) \times M_{hfin}}{(1 + B_w)(1 + w_{fin})} \quad (3.26)$$

Connaissant la masse d'eau totale, le rapport eau sur liant (ciment) e/c qui est un paramètre important pour l'hydratation des matériaux cimentaires peut donc être calculé. On part de la masse totale de solide (M_{ts}) donnée par l'équation 3.27 et de la masse d'eau totale M_{wt} .

$$M_{ts} = M_{si} + M_{liant} \quad (3.27)$$

$$M_{wt} = M_{th} - M_{ts} = M_{wi} + M_{waj} \quad (3.28)$$

$$\frac{e}{c} = \frac{M_{wt}}{M_{liant}} = \frac{M_{wi} + M_{waj}}{\% B_w \times M_{si}} \quad (3.29)$$

Les recettes ont été préparées en utilisant une feuille Excel selon le format présenté à l'annexe 3 réalisée sur la base des relations ci-dessus entre les différents paramètres index des résidus épaissis de départ. Les paramètres d'entrée de la feuille sont la densité spécifique des grains solides, la teneur en eau initiale des résidus, le pourcentage solide du remblai visé et le pourcentage de liant. Le volume total de remblai peut être également précisé. Les données

d'entrée sont déterminantes pour la précision de la recette car elles permettent d'obtenir la masse du résidu sec sur la base de laquelle, les calculs sont réalisés. Les principales recettes préparées et étudiées de manière exhaustive avec le rhéomètre AR 2000 comprennent des résidus simplement épaissis à des pourcentages de solides de 70 %, 72,5 % et 75 %, des recettes de remblais cimentés aux mêmes pourcentages de solides mais avec deux principaux types de liant que sont le ciment Portland type 10 seul (CP10) et le liant constitué d'un mélange de ciment type 10 à 20 % et de laitier de haut fourneau à 80 % (20CP10/80Slag).

Les proportions de chaque liant dans les remblais sont de 2%, 4,5% et de 6%. Les recettes de résidus épaissis et de remblais à 2% de liant correspondent aux caractéristiques des dépôts de surface tandis que les recettes de remblais à 4,5% et de 6% de liant simulent les matériaux de remblayage souterrain. Les recettes testées avec le viscosimètre ConTec avaient un pourcentage solide de 70% et 4,5% de liants formés de ciment portland (CP-10) uniquement et 20% de CP10 et 80% d'ajouts minéraux comme le laitier, les cendres volantes (CV), les filaires calcaires (FC).

Mais en raison de leurs faibles résistances mécaniques relevées par des études antérieures (URSTM), leur caractérisation rhéologique a été limitée aux essais avec le viscosimètre ConTec (moins de complexité).

Le ciment type 10 (CP10) d'usage courant ou GU (General Use) utilisé dans cette étude, est un ciment hydraulique de type CAN/CSA 3001 fabriqué par Lafarge. Les scories ou laitier ou Slag entrant dans les recettes provenaient de l'usine Lafarge Spragge plant 100% straight Slag Product #Y2100007304. Les compositions en oxydes et en éléments chimiques du laitier Lafarge utilisé sont présentées dans les Tableau 3.7 et Tableau 3.8.

Tableau 3.7 : Composition en oxydes du laitier (Slag) Lafarge.

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Sulfate	LOI
Slag Lafarge	36.8	37.0	9.5	0.6	12.8		

Tableau 3.8 Composition élémentaire du laitier Lafarge

Éléments	Al	Ba	Be*	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
Slag Lafarge	5.02	0.071	0.001	26.9	0	0.001	0.003	0.002	0.507

Éléments	Mg	Mn	S	Sb	Ti	Zn
Slag Lafarge	7.43	0.511	1.24	0.001	0.531	0.007

Les facteurs caractéristiques tels que rapport e/c de même que la masse volumique (ρ), la concentration volumique (C_v) et la porosité des recettes préparées sont indiqués dans les Tableaux 3.9 et 3.10 respectivement pour les résidus Doyon et LaRonde.

Tableau 3.9: Quelques caractéristiques des recettes à base des résidus Doyon

Recettes	e/c	ρ (g/cm ³)	C_v (%)	porosité
65% S@0% liant	-	1,722	40	0,60
70% S@0% liant	-	1,821	45	0,55
70% S@2% liant (CP et CP-SG)	21,86	1,821	45	0,55
70% S@4,5% liant (CP, CP-SG, CP-CV et CP-FC)	9,95	1,825	45	0,55
70% S@6% liant (CP et CP-SG)	7,57	1,826	45	0,55
72,5% S@0% liant	-	1,879	48	0,52
72,5% S@2% liant (CP et CP-SG)	19,34	1,881	48	0,51
72,5% S@4,5% liant (CP et CP-SG)	8,81	1,883	48	0,51
72,5% S@6% liant (CP et CP-SG)	6,70	1,885	48	0,50
75% S@0% liant	-	1,935	52	0,48
75% S@6% (CP et CP-SG)	5,89	1,941	51	0,49

Tableau 3.10: Quelques caractéristiques des recettes à base des résidus LaRonde

Recettes	e/c	ρ (g/cm³)	Cv (%)	porosité
65% S@0% liant	-	1,856	35	0,65
70% S@0% liant	-	1,986	40	0,60
70% S@2% liant (CP et CP-SG)	21,86	1,985	40	0,60
70% S@4,5% liant (CP, CP-SG)	9,95	1,983	41	0,59
70% S@6% liant (CP et CP-SG)	7,57	1,982	41	0,59
72,5% S@0% liant	-	2,059	43	0,57
75% S@0% liant	-	2,137	47	0,53

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES MESURES

Les travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de ce projet ont d'abord permis de valider les procédures de mesure sur le rhéomètre AR 2000. Ces travaux ont aussi permis d'aboutir à des résultats concernant les ordres de grandeur des paramètres rhéologiques des différents types de résidus épaissis et de remblais étudiés et de dégager l'influence de certains composants (tel que l'eau et les liants) selon leur type et leur quantité. Ainsi, les résultats généraux portant à la fois sur les mesures rhéologiques et de fluidité sont présentés dans ce chapitre et interprétés. Dans un premier temps, les résultats du calibrage du rhéomètre avec les fluides newtoniens et non-newtonien sont présentés, suivis des résultats de la validation des méthodes de mesure. Cette validation consistait à appliquer les procédures de mesure sur les résidus et à comparer les résultats obtenus avec ceux d'un autre type de rhéomètre. À la suite de cela, l'ensemble des résultats d'essais réalisés sur les résidus aussi bien de la mine Doyon que celle de LaRonde sont présentés. L'ensemble des ajustements des courbes avec différents modèles réalisés dans ce mémoire pour l'obtention des paramètres rhéologiques est présenté à l'annexe 4.

4.1 Résultats des tests de contrôle de qualité

Les résultats des tests de contrôle de qualité concernent d'une part les résultats de calibrage du rhéomètre AR 2000 par l'usage de fluides de référence (newtoniens et non-newtoniens) et d'autre part, les résultats de la validation des procédures de mesure sur des échantillons de remblai. Cette phase de validation a nécessité l'utilisation d'un autre rhéomètre équipé d'une autre géométrie (cylindres coaxiaux de type Couette), en l'occurrence le viscosimètre ConTec du Laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke. Le calibrage consiste à vérifier les relations entre contrainte et taux de cisaillement pour un fluide dont le comportement est connu d'avance. La mise en œuvre de cette phase vise à s'assurer du bon fonctionnement du rhéomètre AR 2000 à travers une évaluation de l'exactitude des mesures issues de cet appareil. La validation, quant à elle, visait à confirmer l'adaptation des procédures de mesure à travers la comparaison des résultats obtenus à partir d'appareils et de géométries différentes afin d'adopter la procédure idoine applicable aux

résidus. Ainsi, le calibrage a été réalisé avec les géométries des plaques parallèles à stator lisse et rugueux et avec la géométrie du moulinet (*Vane*) tandis que la validation a été faite en utilisant uniquement les plaques parallèles dont le disque inférieur est rugueux et la géométrie de moulinet ou «*Vane*» à cause des situations de perturbation relevées avec la plaque lisse (Diouf, 2005).

Les résultats sont constitués des valeurs enregistrées pour les différentes variables et constantes en contrôlant dans un premier temps la variable contrainte de cisaillement (τ), et dans un second temps le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$). En se référant aux équations traduisant le comportement des fluides standards, les courbes d'écoulement de référence ont été obtenues et comparées à celles expérimentales pour des fins d'interprétation (évaluer les écarts entre ces valeurs). La capacité du rhéomètre AR 2000 à fonctionner en mode dynamique a aussi été évaluée avec le fluide standard non-newtonien, bien que ce mode ne soit pas systématiquement utilisé pour mesurer les paramètres rhéologiques des résidus.

4.1.1 Résultats des tests de calibrage avec les fluides standards newtoniens

L'essai de calibrage du rhéomètre avec le fluide standard RT a consisté à soumettre un échantillon de ce fluide à une plage de contrainte de cisaillement allant de 0 à 90 Pa et à échantillonner des points à des intervalles de temps de 10 s. Les courbes d'écoulement et de viscosité obtenues pour le fluide standard newtonien RT 60000 avec la géométrie des plaques parallèles rugueuses (PR) selon la procédure du *continuous ramp step flow (CRS)* sont représentées à la Figure 4.1. Cette figure comporte également les courbes d'écoulement et de viscosité de référence du fluide standard et permet ainsi d'effectuer une comparaison avec la courbe mesurée. La viscosité de référence du fluide est de 60 Pa.s.

Les courbes d'écoulement et de viscosité du fluide standard newtonien RT 12500 de viscosité de 12,5 Pa.s plus faible que le RT 60000, ont été mesurées en utilisant la géométrie de moulinet. Elles sont présentées à la Figure 4.2 et indiquent un bon accord avec les courbes de référence respectives. Les ajustements de ces courbes, réalisés avec le modèle de Newton du logiciel d'analyse des données rhéologique de TA instrument advantage, sont présentés à l'annexe 1.

De la Figure 4.1, on relève une bonne superposition des différentes courbes, aussi bien avec la géométrie des plaques parallèles qu'avec le moulinet. La déviation standard entre les courbes de référence et expérimentales est d'environ 0,002.

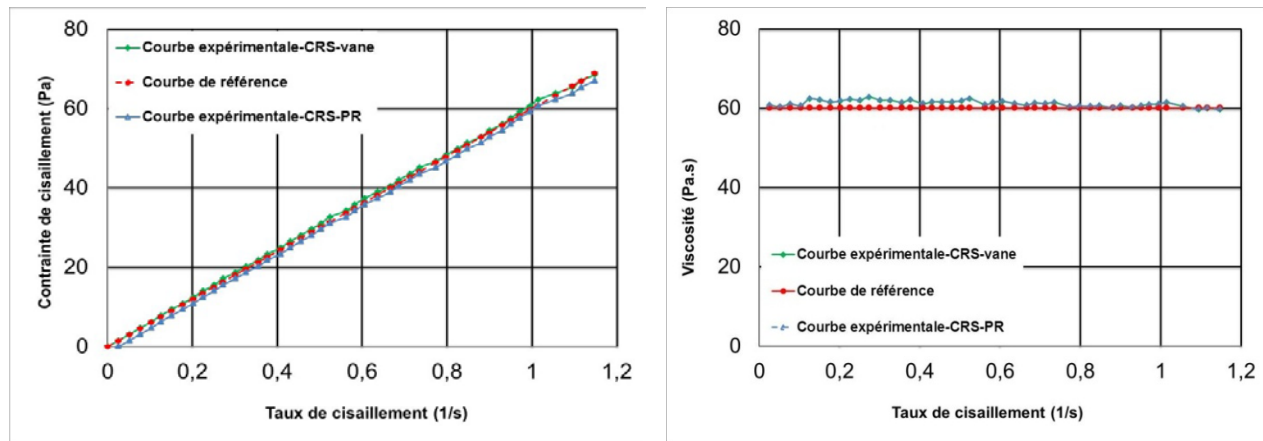


Figure 4.1 : Courbes d'écoulement (à gauche) de viscosité (à droite) du fluide standard newtonien RT 60000 avec les géométries des plaques parallèles rugueuses et du moulinet ou «Vane».

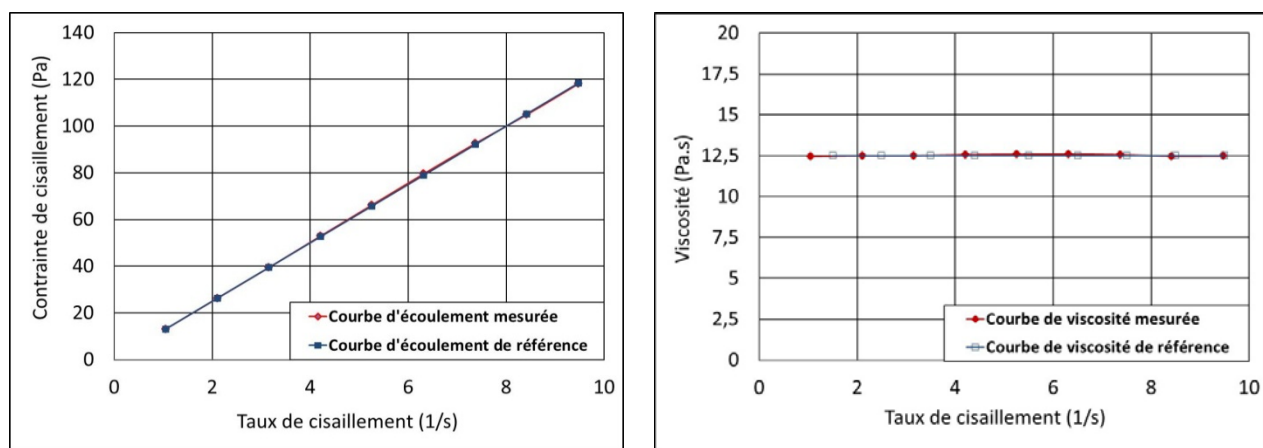


Figure 4.2 : Courbes d'écoulement (à gauche) et de viscosité (à droite) de fluide standard newtonien RT 12500 avec la géométrie de Vane.

4.1.2 Résultats des tests de calibration avec le fluide standard non-newtonien NNTF1 en mode écoulement

Le fluide standard non-newtonien NNTF1 a été testé selon trois procédures de mesure en «mode écoulement» avec les géométries des plaques parallèles lisses, rugueuses et celle du moulinet. Plusieurs courbes d'écoulement ont été enregistrées avec les procédures du *peak hold*, *continuous ramp flow*, *steady state step flow* et du *stepped flow step*.

La procédure du *peak hold step* a été mise en œuvre avec le fluide non-newtonien et les géométries du moulinet et des plaques parallèles rugueuses dans le but de déterminer le temps moyen d'échantillonnage des points pour les mesures selon les procédures subséquentes. Dans cette procédure, le taux de cisaillement a été fixé à $0,01 \text{ s}^{-1}$ pour un échantillonnage par seconde pendant 2 minutes. La Figure 4.3 présente la courbe de la contrainte de cisaillement en fonction du temps pour les différentes géométries. Cette figure a permis de fixer le temps nécessaire pour atteindre le point maximal (*peak*) de la contrainte qui est de 10 s. Ce temps est aussi considéré comme le temps minimal pour atteindre l'équilibre lors des tests, même si l'équilibre peut être atteint plus rapidement pour les contraintes et taux de cisaillement plus élevés.

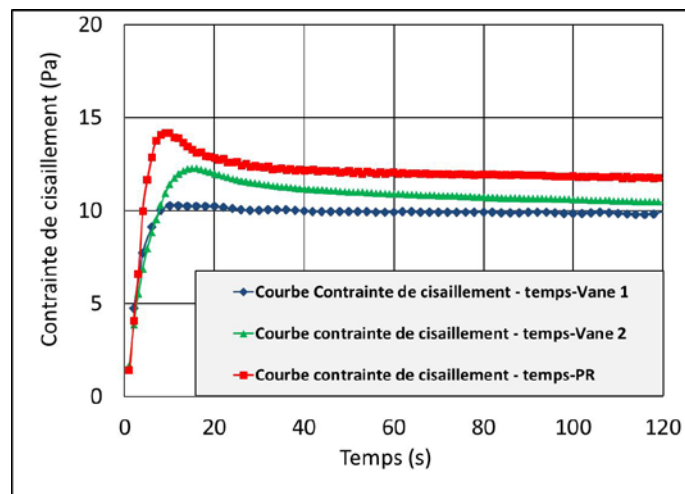


Figure 4.3 : Courbe de contrainte de cisaillement-temps pour le fluide NNTF1 avec les géométries du moulinet (Essais Vane 1 et 2) et des plaques parallèles rugueuses.

Les courbes expérimentales ont été obtenues pour chaque géométrie (plaques parallèles et du moulinet) en faisant varier la contrainte de cisaillement de 0 à 90 Pa ou le taux de cisaillement de 0 à 600 s⁻¹ et les points ont été enregistrés à des intervalles de temps de 10 s tel qu'indiqué dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Condition de mise en œuvre du calibrage avec le fluide NNTF 1 en mode écoulement (pour les géométries des plaques parallèles et de du moulinet)

Mode	Contrainte de cisaillement (Pa)	Taux de cisaillement (1/s)	Temps par point (sec)	Nombre de points
<i>Steady state step</i>	0 - 90	0 - 600	10	20
<i>Continuous Ramp</i>	0 - 90	0 - 600	10	20
<i>Stepped flow step</i>	0 - 90	0 - 600	10	20

La contrainte de cisaillement a été obtenue à l'aide des calculs en intégrant les valeurs de taux de cisaillement dans les différents modèles selon la plage de comportement du fluide tel que fournies par le fabricant du fluide (cf section 3.2.2).

La Figure 4.4 présente une comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec la géométrie des plaques parallèles à stator lisse (PL) et rugueux (PR) respectivement, en contrôlant la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement et les courbes de référence tandis que la Figure 4.5 présente la comparaison des courbes expérimentales obtenues avec la géométrie du moulinet et celles de la référence. Sur toutes ces figures, on distingue les courbes d'écoulement expérimentales mesurées sur le rhéomètre AR 2000, la courbe de référence produite par le fabricant du fluide, de même que les courbes d'écoulement minimale et maximale. À travers ces figures, on constate que les courbes obtenues pour toutes les géométries, en contrôlant la contrainte de cisaillement, commencent à l'origine et progressent jusqu'au seuil de cisaillement avant que l'écoulement ne commence véritablement, tandis que les courbes en contrôle du taux de cisaillement commencent directement après le seuil de cisaillement. La procédure de contrôle

en contrainte de cisaillement met ainsi en évidence, de manière plus précise, le seuil de cisaillement que le mode de contrôle en taux de cisaillement.

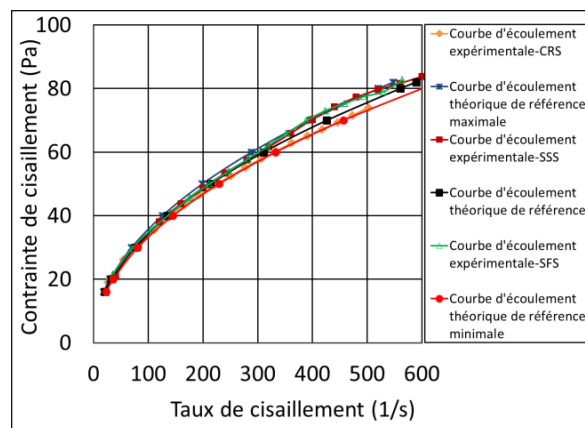
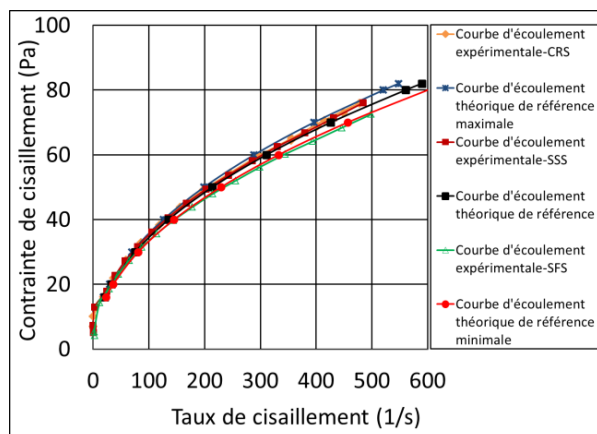
De plus, les courbes expérimentales mesurées sur les stators lisse et rugueux en mode contrôle en contrainte présentent une assez bonne superposition avec la courbe de référence. Elles sont toutes les deux situées entre les courbes minimale et maximale. Cela dénote un bon calibrage du rhéomètre AR 2000 avec le mode de variation de contrainte. On y relève quelques perturbations sur les courbes expérimentales en mode de contrôle en taux de cisaillement avec le stator rugueux à des taux de cisaillement élevés (à partir de 400 s^{-1}). La détermination des paramètres rhéologiques du fluide par les modèles intégrés au logiciel d'analyse des données rhéologiques donne un seuil de cisaillement moyen de 10,63Pa pour les courbes mesurées contre une valeur de référence de 10,7 Pa soit une différence de 0,07 Pa ou 0,05%. Cela confirme en même temps le comportement du fluide de référence obtenu par le fabricant PTB.

Les résultats obtenus avec la géométrie du moulinet dans une première série de tests (essai 1) selon les deux modes de contrôle en taux et en contrainte de cisaillement (voir Figure 4.5) montrent un écart assez important entre les courbes mesurées et celle de référence. Les courbes obtenues par le rhéomètre AR 2000, bien qu'identiques pour les différentes procédures (CRS, SSS et SFS rigoureusement superposables), ne sont pas comprises dans les limites d'incertitude données par le fabricant du fluide. On constate que les courbes mesurées sont nettement plus basses par rapport à celles de référence. Cet état de fait peut être vraisemblablement attribué à un volume d'échantillon inférieur au volume requis pour la mesure. Pour confirmer cela, une deuxième série de tests (essais 2) a été entreprise et cette fois les courbes étaient plutôt légèrement au-dessus des limites d'incertitudes. Ces résultats montrent une certaine dépendance des courbes aux volumes de l'échantillon avec la géométrie du moulinet. Ces résultats montrent une certaine sensibilité des courbes au volume de l'échantillon qui doit alors être rigoureusement déterminé pour s'assurer d'obtenir des résultats précis.

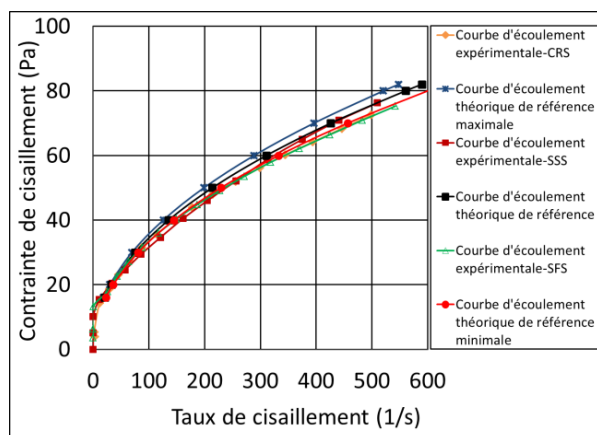
Contrainte de cisaillement contrôlé

Taux de cisaillement contrôlé

PL



P



R

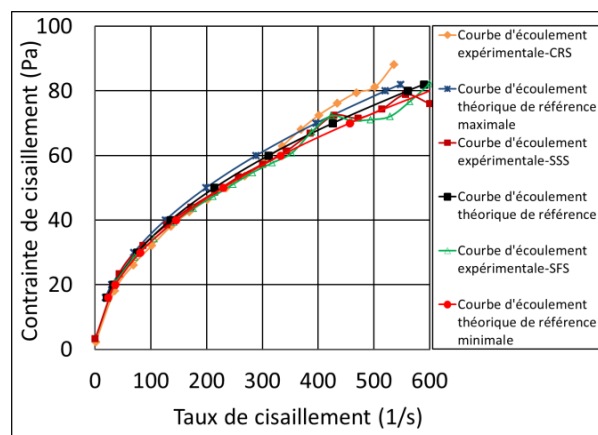


Figure 4.4 : Comparaison des courbes d'écoulement expérimentales du fluide non-newtonien NNTF1 obtenues avec le stator lisse et rugueux en mode de contrôle en contrainte de cisaillement et en taux de cisaillement selon les procédures du *continuous ramp step* (CRS), du *steady state step* (SSS) et du *stepped flow step* (SFS) et les courbes du fluide de référence.

Contrainte de cisaillement contrôlé

Taux de cisaillement contrôlé

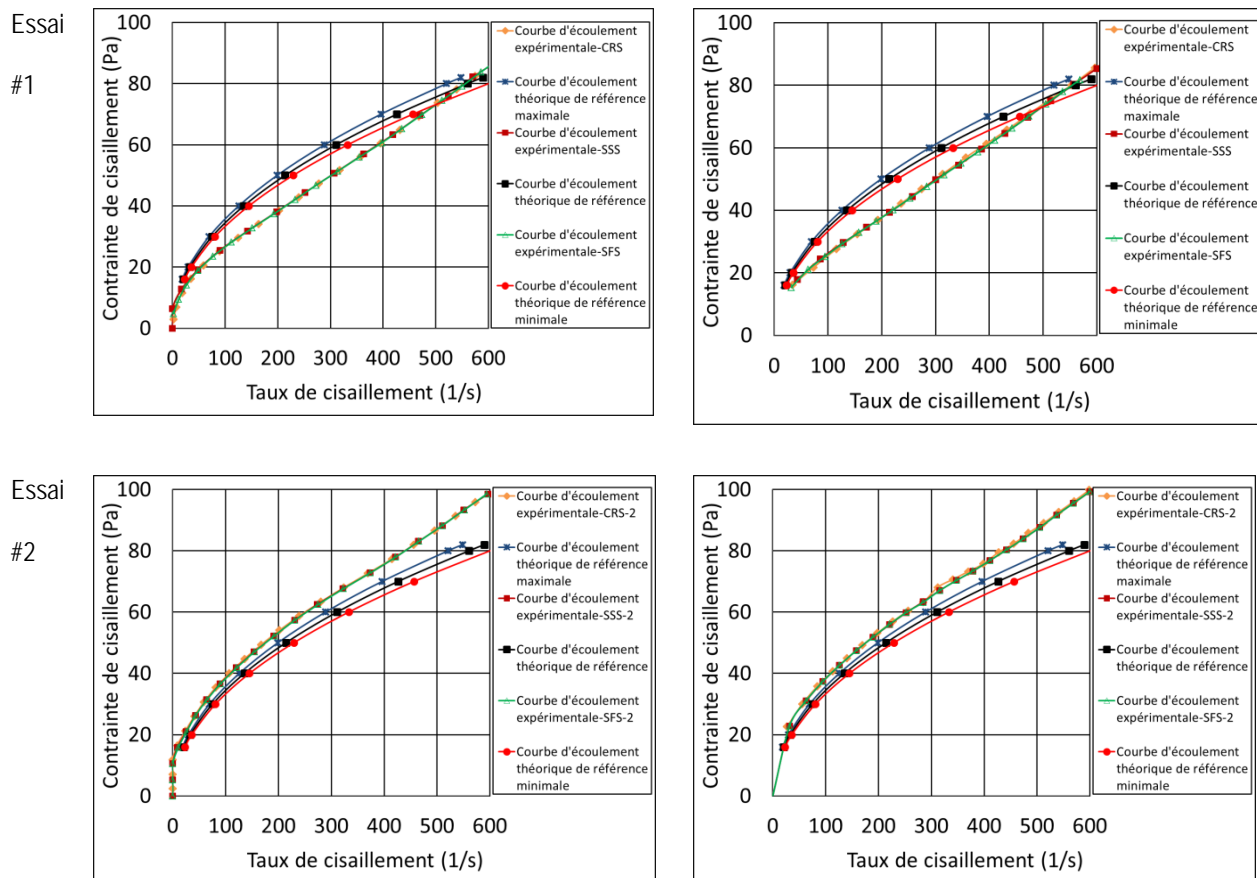


Figure 4.5 : Comparaison des courbes d'écoulement expérimentales du fluide non-newtonien NNTF1 obtenues avec la géométrie du moulinet en mode de contrôle en contrainte de cisaillement et en taux de cisaillement selon les procédures du *continuous ramp step* (CRS), du *steady state step* (SSS), et du *stepped flow step* (SFS) et les courbes du fluide de référence (Essai 1 avec volume d'échantillon inférieur au volume requis; essai 2 avec volume d'échantillon légèrement supérieur au volume requis).

En présentant les courbes d'écoulement obtenues avec le fluide standard selon des procédures de mesure identiques ou différentes sur un même graphe (Figures 4.4 et 4.5), elles rendent compte de la répétitivité et la reproductibilité des mesures d'une procédure à l'autre. À travers ce type de représentation dans un même graphique, si les courbes d'écoulement sont assez semblables pour une même procédure sur un même échantillon, cela indique que la mesure peut être répétée sans perturbation majeure. Pour la reproductibilité, elle est estimée par la plus ou moins bonne

superposition des courbes d'écoulement de différentes procédures appliquées sur des échantillons différents, comme c'est le cas avec les mesures issues de deux géométries différentes (plaques parallèles à stators lisse et rugueux et du moulinet)

4.1.3 Résultats des tests de calibration avec le fluide standard non-Newtonien NNTF1 en mode dynamique

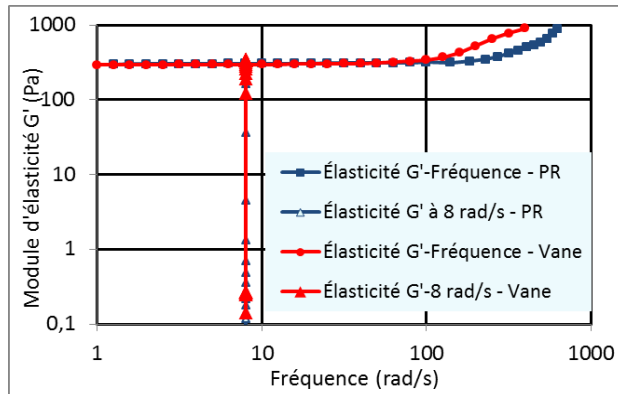
Le fluide standard non-newtonien NNTF1 a aussi été testé en mode dynamique avec les géométries des plaques parallèles à stator rugueux et du moulinet. Pour l'évaluation du fluide selon le mode dynamique, la procédure de balayage de fréquence a été la première étape mise en œuvre pour investiguer le comportement dynamique du fluide non-newtonien NNTF1. Les conditions des procédures dynamiques sont présentées dans le Tableau 4.2. La fréquence de mesure a alors été variée de 0,1 rad/s à 628,13 rad/s c'est de 10^{-4} à 100 Hz (limite maximum du rhéomètre) afin de déterminer la zone de comportement linéaire du fluide. Ce balayage de fréquence qui doit être réalisé sous une faible amplitude de contrainte oscillatoire (TA instrument) a été exécuté en fixant cette amplitude de la contrainte à 0,8 Pa. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4.6. Dans cette figure sont représentées les courbes du module d'élasticité de stockage G' , du module de perte G'' et de la viscosité complexe η^* en fonction de la fréquence. La courbe du module de stockage G' en fonction de la fréquence montre une évolution linéaire aux basses fréquences jusqu'à approximativement 100 rad/s, avant d'amorcer une courbure croissante marquant la fin de la zone linéaire. Selon le manuel de TA Instrument, seules les mesures de balayage de contrainte réalisées dans la zone linéaire qui permettent de saisir le comportement général du fluide. Les mesures avec les fréquences situées dans la zone non linéaire tombent directement sur un comportement visqueux qui ne permet pas de déterminer le seuil de cisaillement. La courbe verticale correspond à la courbe de G' obtenue selon la procédure oscillatoire du *stress sweep step* qui a été appliquée à l'échantillon du fluide standard non-newtonien (NNTF1) en imposant une contrainte oscillatoire variant de 0 à 100 Pa avec la fréquence fixée à 8 rad/s situé dans la région linéaire afin de pouvoir couvrir le comportement globale du fluide. Les Figure 4.6b et Figure 4.6c sont les représentations en échelle logarithmique des courbes de G' , G'' et η^* obtenues selon la procédure du *stress sweep* avec la fréquence fixée

à 8 rad/s en fonction de la contrainte oscillatoire pour les géométries respectivement des plaques parallèles à stator rugueux et du moulinet. Ces figures permettent de voir la partie élastique du comportement du fluide entre 0,001 Pa jusqu'à la valeur du seuil de cisaillement (environ 10,7 Pa) matérialisé par la constance du module de stockage G' et la viscosité complexe sur cette plage de contrainte. Le seuil de cisaillement déterminé sur le graphique Figure 4.6.d à partir du logiciel d'analyse a donné la valeur de 10,63 Pa contre 10,7 Pa donné par le fabricant du fluide, soit un écart de 0,07 Pa ou 0,065 %. Les résultats obtenus avec le mode oscillatoire sont donc assez similaires aux valeurs de référence. Lorsque la contrainte de cisaillement est supérieure au seuil de cisaillement, s'amorce alors une décroissance des courbes de G' et η^* indiquant le début de l'écoulement. De plus, entre 0,001 Pa et le seuil de cisaillement, la courbe de G' est au-dessus de la courbe de perte G'' traduisant la dominance du caractère plastique et au-delà du seuil de cisaillement, la courbe de G'' est cette fois au-dessus de la courbe de stockage G' , indiquant la prédominance du comportement visqueux.

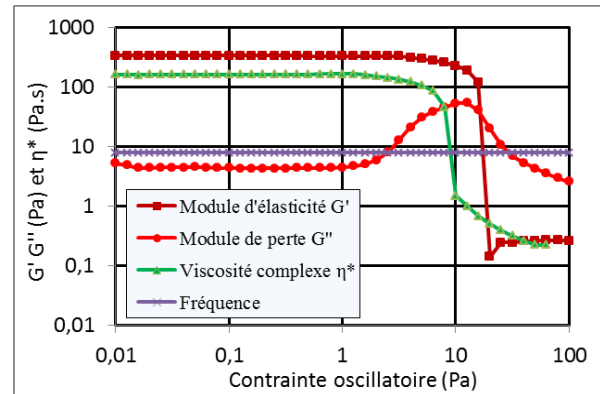
Cependant, la courbe de stockage G' obtenue avec le moulinet est légèrement en dessous de la courbe de stockage G' obtenue avec les plaques parallèles et semble sous-estimer le seuil de cisaillement tout comme les courbes d'écoulement obtenue avec cette géométrie. Cela confirme la sensibilité des essais au volume de matériau requis.

Tableau 4.2 : Conditions d'essais pour le fluide non-newtonien NNTF1 en mode dynamique avec la géométrie des plaques parallèles à stator rugueux et le moulinet

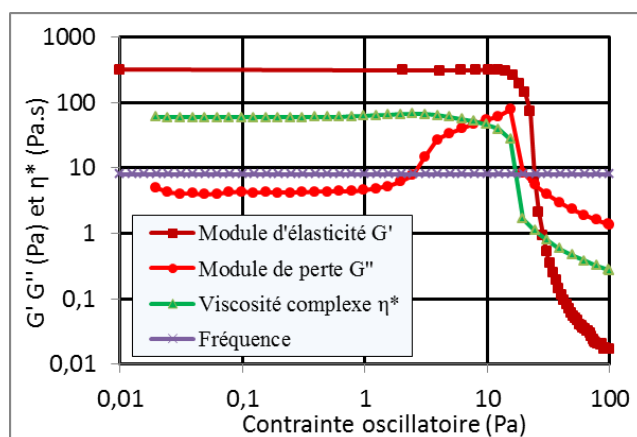
Procédures dynamique	Contrainte oscillatoire (Pa)	Fréquence (rad/s)
<i>Frequency sweep</i>	0,8	0,001-628,3
<i>Stress sweep</i>	0-100	8



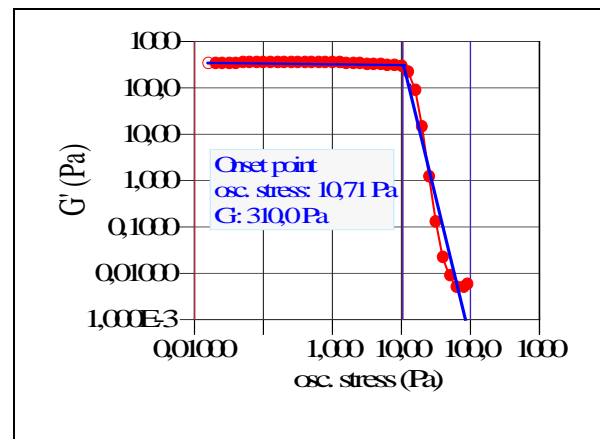
a) Procédure du *frequency sweep* avec les plaques parallèles à stator rugueux et la vane



b) Procédure de *stress sweep* à $f=8$ rad/s avec la Vane



a) Procédure de *stress sweep* à $f=8$ rad/s avec la plaque rugueuse



b) Résultat de l'ajustement de la courbe d'élasticité pour la détermination du seuil d'écoulement

Figure 4.6 : Résultats des essais dynamiques sur le fluide NNTF1 avec la géométrie des plaques parallèles à stator rugueux et du moulinet selon les procédures de balayage fréquentiel («*frequency sweep*») et de contrainte («*stress sweep*»).

On peut retenir que les mesures de calibration par l'utilisation des fluides standards newtoniens RT 12500 et RT 60000 et du fluide non-newtonien NNTF1 ont données des courbes d'écoulement assez comparables entre elles, quelques soit la procédure, le mode de chargement adopté, et la

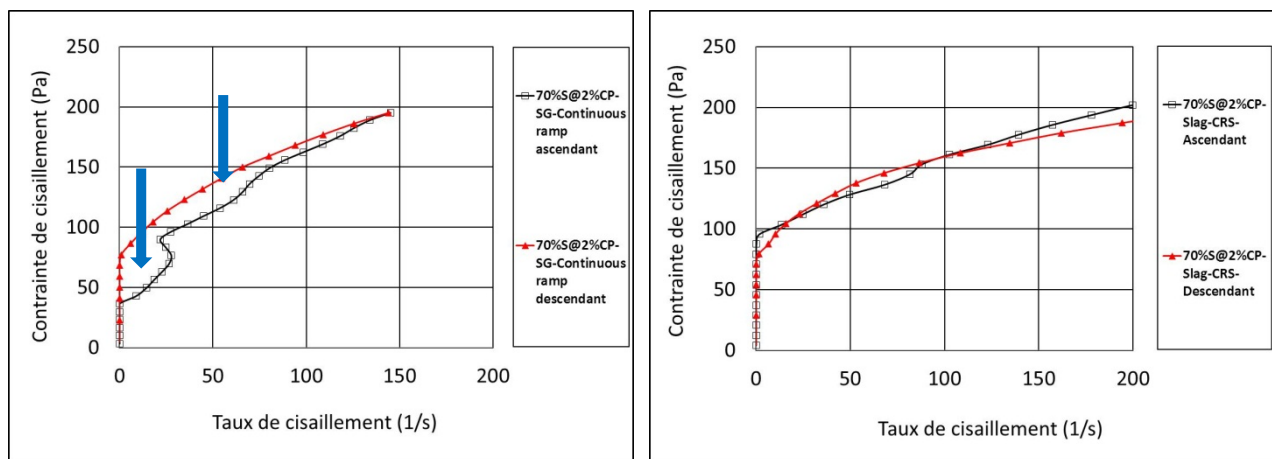
géométrie utilisée lorsqu'on procède à des mesures en mode écoulement. En ce qui concerne la géométrie du moulinet, il ressort que les résultats sont beaucoup influencés par le volume de l'échantillon à mettre dans le cylindre statique. À l'opposé de cette géométrie (le moulinet), celle des plaques parallèles permet d'ajuster le volume de l'échantillon au cours de l'abaissement du rotor en refoulant l'excès de matériau qui peut être nettoyé du stator avant le début de l'essai.

Dans le cas de la géométrie de moulinet, cela n'est pas possible rendant du même coup les mesures très dépendantes de la précision du volume. En dépit de cet état de fait, les courbes produites avec la géométrie du moulinet sont rigoureusement superposables. Aussi, l'allure générale des courbes mesurées pour chaque fluide est conforme avec celle de leurs courbes de référence respectives notamment pour les courbes de la géométrie de plaques parallèles fournies par le fabricant des fluides (annexe 2). Les courbes produites avec le fluide non-newtonien NNTF1 selon le mode dynamique sont assez comparables d'une géométrie à l'autre lorsqu'on utilise les mêmes procédures de cisaillement oscillatoire. L'ensemble de ces résultats dénote donc de la capacité du rhéomètre AR 2000 à effectuer des mesures fiables sur des fluides non-newtoniens et avec les différentes géométries, aussi bien en mode écoulement qu'en mode dynamique.

4.1.4 Résultats des tests de validation des procédures de mesure sur des résidus réels à l'aide de rhéomètre AR 2000

Dans le but d'évaluer l'adaptabilité des procédures de mesure sur des remblais miniers, des tests préliminaires ont été réalisés sur des échantillons de remblai de la mine Doyon. La Figure 4.7 présente les rhéogrammes ascendants et descendants enregistrés avec le remblai Doyon ayant un pourcentage de solides de 70 % et 2 % du liant (20 % CP10/80% Slag) sur la géométrie des plaques parallèles équipé de stators lisse et rugueux. On peut observer sur la courbe ascendante obtenue avec le stator lisse, une phase de légère incursion suivie par la suite d'une croissance régulière de la courbe. Cette phase est plus réduite, voire inexistante sur la même courbe ascendante issue des mesures sur un stator rugueux. Cela dénote, dans le cas du stator lisse, d'une

association de deux phénomènes perturbateurs que sont la sédimentation et le glissement. En effet, tel qu'indiqué dans la section 2.5, le phénomène de sédimentation se traduit par une séparation de la phase solide de celle liquide. Après sa mise en place, l'échantillon a tendance à sédimenter. Cette sédimentation favorise alors le glissement car la phase liquide moins dense en contact avec la géométrie de mesure (rotor) est entraînée avec plus d'énergie par rapport au reste de l'échantillon. Puis, avec l'augmentation de la contrainte, l'échantillon est progressivement homogénéisé. Tout se passe comme si le cisaillement était dans des conditions transitoires. La courbe descendante est moins sujette à ces phénomènes car l'échantillon est continuellement en mouvement depuis des taux de cisaillement élevés jusqu'à l'atteinte du seuil de cisaillement avant que la sédimentation ne puisse s'installer. En raison des perturbations relevées avec la plaque lisse, l'application des procédures de mesure s'est faite avec la plaque rugueuse qui s'est révélée plus adéquate avec les résidus.



a) Résultat avec le stator lisse

b) Résultat avec le stator rugueux

Figure 4.7 : Comparaison des courbes d'écoulement obtenues avec du remblai cimenté fait avec les résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 2 % du liant CP-SG utilisant les stators lisse et rugueux: a) perturbations relevées sur la courbe d'écoulement ascendante avec le stator lisse et b) perturbations avec le stator rugueux.

Dans la suite, les remblais faits des résidus de la mine Doyon utilisés pour cette phase de validation des procédures avaient un pourcentage de solides de 70 % et un pourcentage liant de 4,5 % (CP10 et 20CP10/80Slag). Les trois procédures de mesure en mode écoulement (*continuous ramp*, *steady state step*, et *stepped flow step*) pour l'obtention de la courbe d'écoulement ont été mises en œuvre sur lesdits mélanges de remblai après avoir fixé le temps moyen nécessaire pour atteindre l'équilibre à l'aide de la procédure *peak hold*. La Figure 4.8 présente les courbes contrainte de cisaillement en fonction du temps obtenues avec l'application de la procédure *peak hold* sur différentes recettes de remblai et à un taux de cisaillement fixé à $0,08 \text{ s}^{-1}$ et un échantillonnage à chaque seconde.

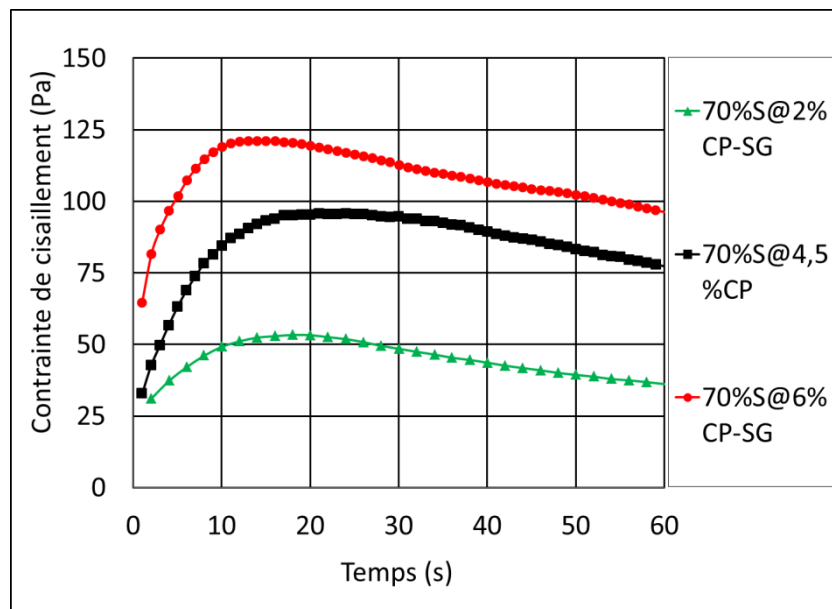


Figure 4.8: Courbes contrainte-temps obtenues avec la géométrie de plaques parallèles rugueuses à un taux de cisaillement de $0,08 \text{ s}^{-1}$ pour quelques recettes de remblais Doyon avec un pourcentage de solides de 70 % et un pourcentage de liant (CP et CP-SG) de 2 %, 4,5 % et 6 %.

À l'aide la Figure 4.8, le temps moyen nécessaire pour enregistrer la valeur maximale représentative de la contrainte pour un taux de cisaillement constant a été déterminé soit environ 10 secondes. Ainsi, pour les mesures en mode écoulement, un pré-cisaillement sous une contrainte de cisaillement de 200 Pa a été appliquée à l'échantillon pendant 30 s puis diminué de 200 Pa à 0 Pa avec un échantillonnage de 20 points en 3 min 30 s dans le cas du *continuous ramp*

(soit environ 10 s par point). Pour les procédures de *steady state step* et *stepped flow step*, le temps de mesure a aussi été fixé à 10 s avec un temps maximal de 20 s.

Les résultats des tests sur les échantillons de remblai faits des résidus de la mine Doyon selon les différentes procédures sont présentés sur les Figures 4.9 et 4.10 respectivement pour les remblais confectionnés uniquement à base de ciment portland type 10 (CP10) et les remblais faits avec le liant 20CP10/80 Slag. Les résultats concernent uniquement les courbes rhéologiques enregistrées juste après l'ajout de liant, soit à environ 10 minutes d'âge, cela afin de minimiser l'influence des conditions ambiantes sur la comparaison des résultats. Pour les deux types de liant, il ressort que les courbes d'écoulement obtenues selon les trois procédures sont presque identiques, ce qui corrobore les résultats avec les fluides standards sur la répétitivité et la reproductivité des essais avec la géométrie des plaques parallèles à stator rugueux.

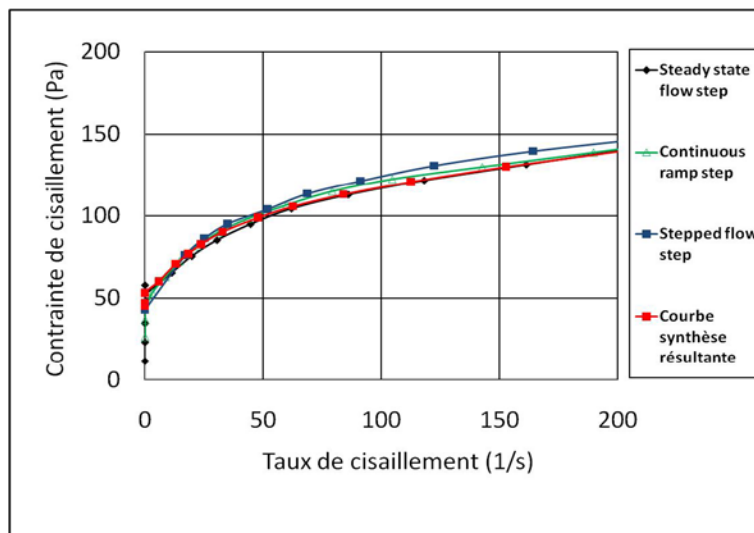


Figure 4.9 : Application des procédures de mesure sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et avec 4,5 % du liant CP10 seul à 10 minutes d'âge (géométrie des plaques parallèles, stator rugueux).

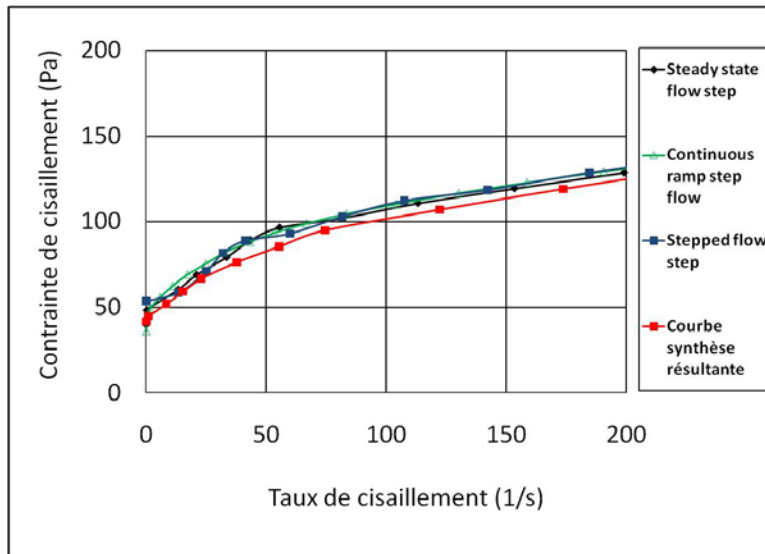


Figure 4.10 : Application des procédures de mesure sur le remblai Doyon à 70% solide et avec 4,5% 20CP10/80Slag (CP-SG) à 10 minutes d'âge (géométrie des plaques parallèles, stator rugueux).

Pour évaluer la validité de la méthode dynamique, bien que n'ayant pas été systématiquement utilisé dans cette étude, des essais selon la procédure du *stress sweep* ont été réalisés sur des remblais faits des résidus de la mine LaRonde à 70 % de solides et 4,5 % du liant 20CP10/80Slag. La Figure 4.11 présente les résultats de cet essai dynamique avec son correspondant en mode écoulement. On y relève une assez grande similitude des valeurs des paramètres rhéologiques reportés dans le Tableau 4.3.

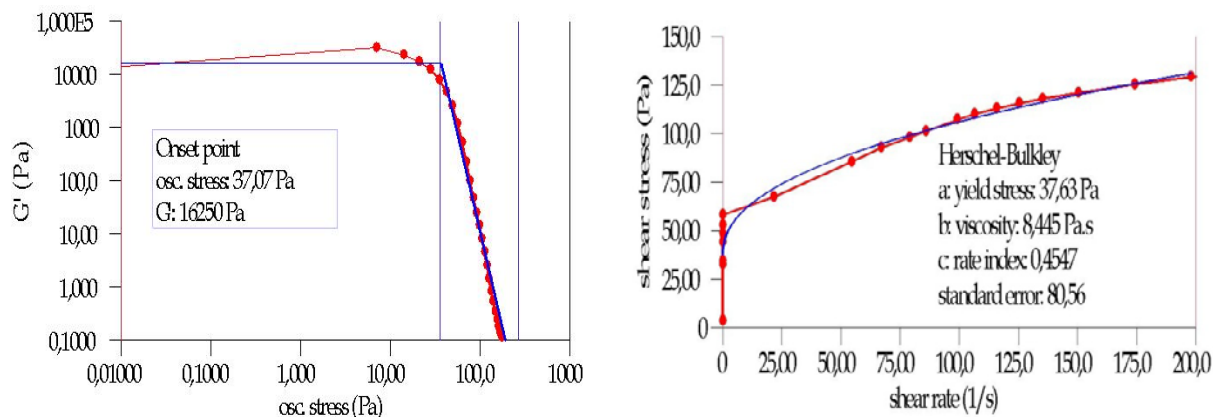


Figure 4.11: Résultats en mode dynamique (à gauche) et en mode écoulement (à droite) du remblai fait des résidus de la mine LaRonde à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG.

Tableau 4.3 : Résultats des paramètres rhéologiques du remblai laRonde à 70%S@4,5% de liant CP-SG selon les différents modes opératoires

Modes	Écoulement	Oscillatoire
Seuil de cisaillement (en Pa)	37,07	37,63
Viscosité à l'infini (en Pa.s)	0,22	0,21

4.1.5 Comparaison des résultats des tests de AR 2000 et ConTec

Dans le but de fixer définitivement la méthode de mesure et de conforter la fiabilité des résultats des tests réalisés avec le rhéomètre AR 2000, une série de tests a été entreprise avec le viscosimètre ConTec dont les caractéristiques sont présentées dans la section 3.2.3. En effet, les paramètres rhéologiques étant des caractéristiques intrinsèques des matériaux, ils doivent demeurer, en dehors des variations des conditions ambiantes (pression et température), à des valeurs similaires tout au moins dans une marge acceptable, quelle que soit l'appareil de mesure utilisé.

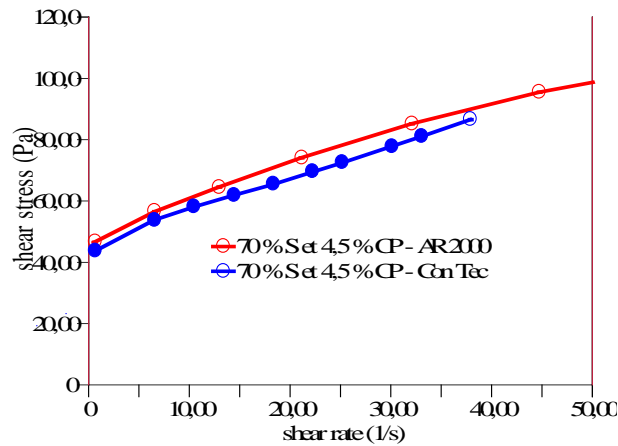
Pour ce faire, les mêmes recettes de remblai fait avec des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et à 4,5 % du liant CP10 et 4,5 % du liant 20CP10/80Slag ont été testées avec la géométrie Couette du ConTec. Les résultats issus de ces mesures sont initialement sous forme de

résistance exercée par les matériaux sur le cylindre interne en fonction de la vitesse de rotation du cylindre externe. Afin de pouvoir procéder à une comparaison avec les résultats du rhéomètre AR 2000, ces données ont été transformées en paramètres conventionnelles de mesures rhéologiques, soient la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement, en utilisant les équations 2.27 et 2.28 comme indiqué par Feys et al., (2007). Après cette transformation, les valeurs des contraintes et du taux de cisaillement ont été insérées dans le logiciel d'analyse des données rhéologiques de TA instruments (*Rheological Data Analysis Advantage*) afin de pouvoir effectuer les traitements et analyses identiques que pour les résultats du rhéomètre AR 2000. Compte tenu du fait que le taux de cisaillement maximal atteint dans les procédures de mesure du viscosimètre ConTec est relativement faible (de l'ordre de 40 s^{-1}), les courbes obtenues par l'AR 2000 ont été analysées sur la même portion, soit entre $0-50 \text{ s}^{-1}$. L'application de certains modèles rhéologiques (Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross) a permis d'évaluer les paramètres rhéologiques répertoriés dans le Tableau 4.4 et 4.6 pour quelques recettes des deux types de résidus (Doyon et LaRonde).

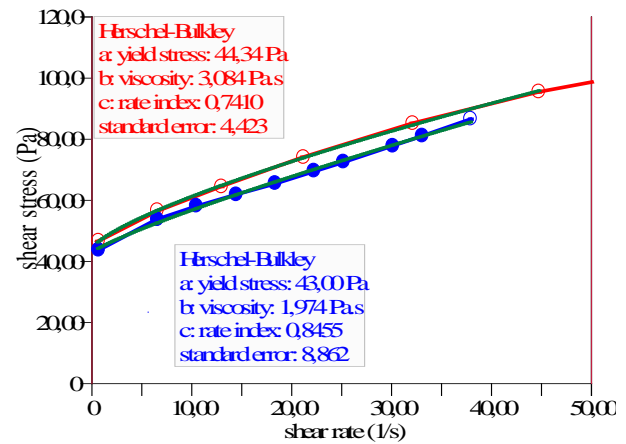
➤ **Pour les résidus Doyon**

Les Figure 4.12A et Figure 4.12B présentent les courbes d'écoulement et de viscosité obtenues pour les remblais Doyon ayant 70%S et 4,5% de liant CP et CP-SG à 10 minutes d'âge sur les deux appareils. Les paramètres rhéologiques découlant de l'application des modèles rhéologiques sont répertoriés dans le Tableau 4.4.

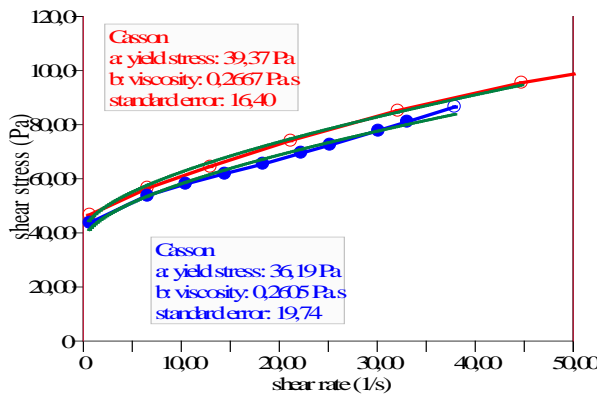
Sur les graphiques, en abscisse le *shear rate* correspond au taux de cisaillement (en $1/s$) et le *shear stress* en ordonnée correspond à la contrainte de cisaillement (en Pa).



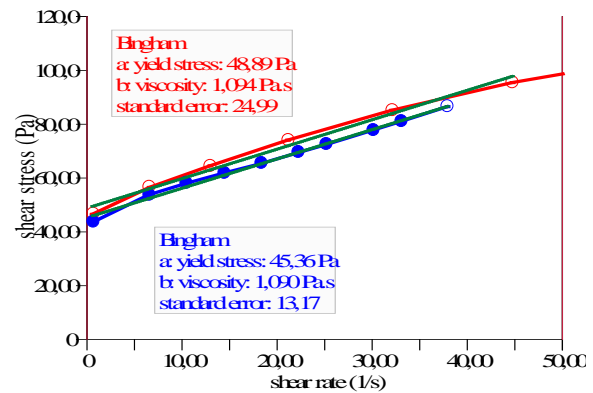
a) Courbes d'écoulement des remblais de Doyon obtenues avec AR 2000 (cercle creux) et ConTec (cercle pleine).



b) Ajustement des courbes de a) au modèle de Herschell-Bulkley

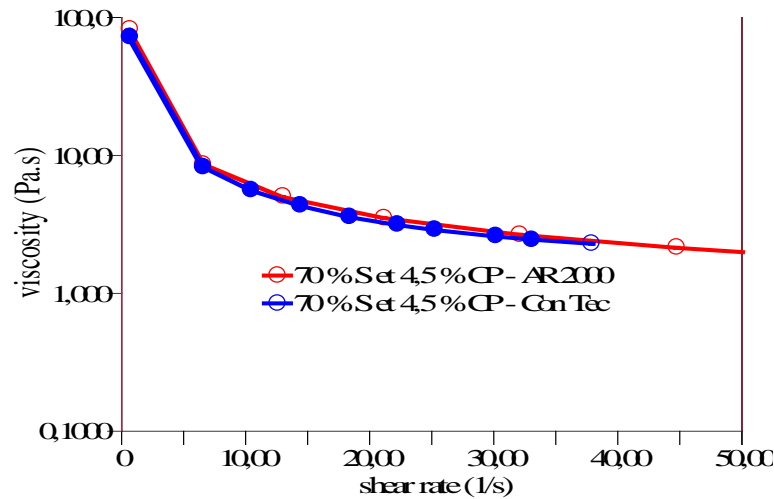


c) Ajustement des courbes de a) au modèle de Casson

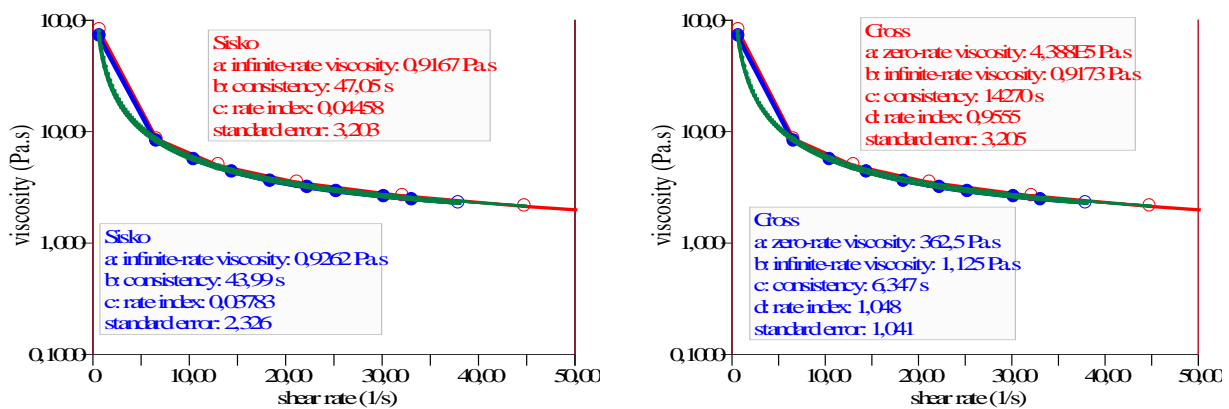


d) Ajustement des courbes de a) au modèle de Bingham

Figure 4.12A : Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareils sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP10 seul (modèles de Herschell-Bulkley, Casson et Bingham)



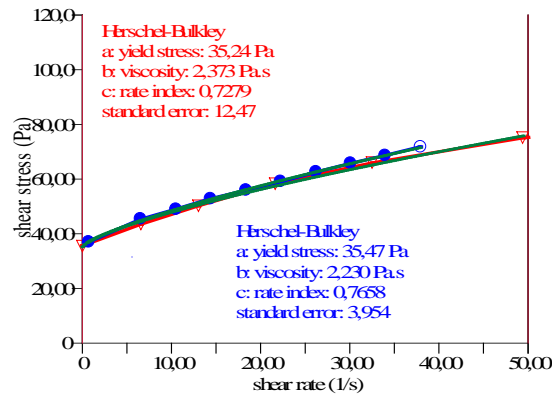
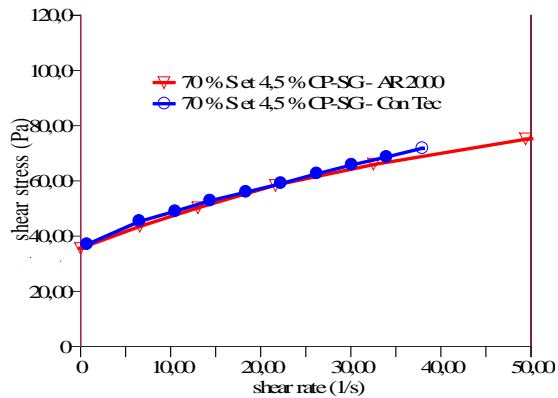
a) Courbes de viscosité des remblais de Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP10 seul obtenues avec le rhéomètre AR 2000 (cercle creux) et le ConTec (cercle plein)



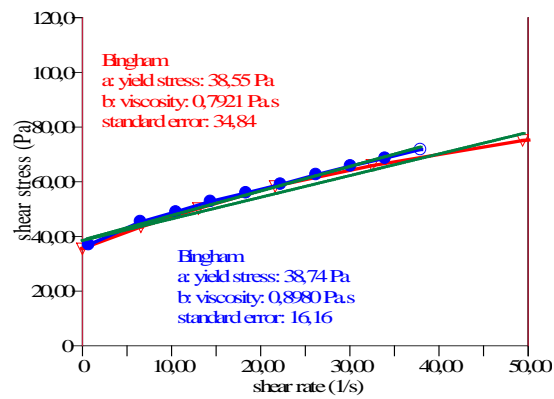
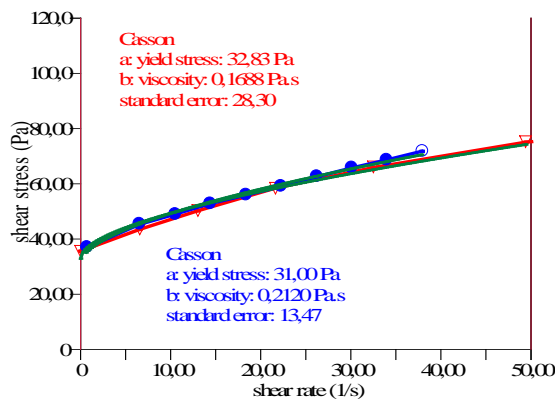
b) Ajustement des courbes de viscosité au modèle de Sisko

c) Ajustement des courbes de viscosité au modèle de Cross

Figure 4.12B : Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareil sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP10 seul (modèles de Sisko et Cross).

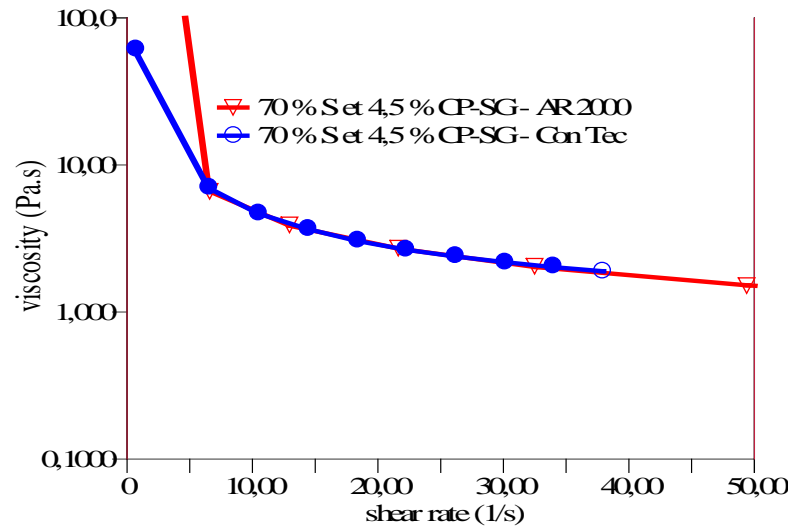


- a) Courbes d'écoulement des remblais de Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG obtenues avec AR 2000 (triangle) et con tec (cercle).
- b) Ajustement des courbes de a) au modèle de Herschell-Bulkley

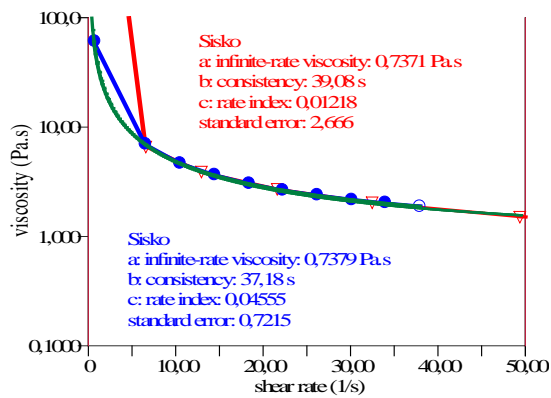


- c) Ajustement des courbes de a) au modèle de Casson
- d) Ajustement des courbes de a) au modèle de Bingham

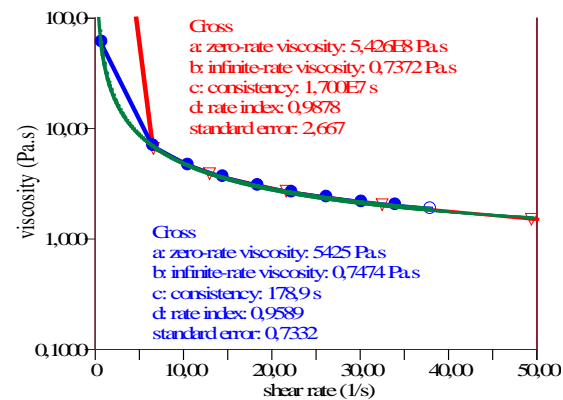
Figure 4.13A : Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareil sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG (modèles de Herschell-Bulkley, Casson et Bingham).



- a) Courbes de viscosité des remblais de Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG obtenues avec AR 2000 (carrés) et ConTec (losanges).



- b) Ajustement des courbes de viscosité de a) au modèle de Sisko



- c) Ajustement des courbes de viscosité de a) au modèle de Cross

Figure 4.13B: Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareil sur le remblai fait des résidus de la mine Doyon à 70 % de solides et 4,5 % du liant CP-SG (modèles de Sisko et Cross)

Tableau 4.4: Comparaison des paramètres rhéologiques obtenus par le rhéomètre AR 2000 et le viscosimètre ConTec pour les remblais Doyon à 70 % de solides et 4,5 % de liant à 70% S et 4,5% liant (CP et CP-SG).

Paramètres	Recettes					
	0 % de liant		4,5 % de CP10		4,5 % de CP-SG	
	AR 2000	ConTec	AR 2000	ConTec	AR 2000	ConTec
$\rho_{\text{mesuré}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,821	1,788	1,826	1,7936	1,827	1,7888
$\rho_{\text{calculé}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,821		1,825		1,822	
Modèle de Herschell-Bulkley						
Seuil de cisaillement (Pa)	12,43	13,03	44,34	43	35,24	35,47
Consistance K_{HB} (Pa.s)	2,88	1,381	3,0843	1,974	2,37	2,23
Index n	0,58	0,52	0,74	0,84	0,72	0,76
Casson						
Seuil de cisaillement (Pa)	15,42	13,26	39,37	36,2	32,83	31
Consistance K_{C} (Pa.s)	0,109	0,0290	0,266	0,262	0,168	0,212
Modèle de Bingham						
Seuil de cisaillement (Pa)	23,52	15,29	48,9	45,36	38,55	38,74
Viscosité Plastique η_{B} (Pa.s)	0,613	0,5895	1,094	1,090	0,792	0,898

Le seuil de cisaillement du remblai à base de CP ajusté au modèle de Herschell-Bulkley est de 44,34 Pa pour le rhéomètre AR 2000 contre 43 Pa pour ConTec. La consistance K du modèle est de 3,084 Pa.s pour AR 2000 et 1,97 Pa.s pour ConTec. L'ajustement des courbes d'écoulement au modèle de Casson a donné les valeurs du seuil de cisaillement de 39,37 Pa pour AR 2000 et 36,2 Pa pour ConTec. Les consistances des recettes pour ce modèle sont respectivement de 0,266 Pa.s et 0,262 Pa.s pour AR 2000 et ConTec. Si les courbes sont ajustées aux modèles de Bingham, les seuils de cisaillement sont de 48,9 Pa pour AR 2000 et 45,3 Pa pour ConTec. La

viscosité plastique de Bingham obtenue avec le rhéomètre AR 2000 est de 1,09 Pa.s contre 1,09 Pa.s avec le ConTec.

Pour les recettes dont le liant est constitué de 20% de CP10 et 80% de laitier, le seuil de cisaillement de Herschell Bulkley est de 35,24 Pa pour AR 2000 et 35,47 Pa pour le ConTec tandis que la consistance se situe à 2,37 Pa.s et 2,23 Pa.s respectivement pour AR 2000 et le ConTec. Le modèle de Casson a donné un seuil de cisaillement de 32,83 Pa pour AR 2000 et 31 Pa pour le ConTec tandis que la consistance se situait à 0,2384 Pa.s pour AR 2000 et 0,212 Pa.s pour le ConTec. Enfin, l'application de l'équation de Bingham a permis d'obtenir les valeurs de 38,55 Pa et 38,7 Pa comme seuil de cisaillement pour respectivement les rhéomètres AR 2000 et ConTec, les viscosités plastiques étant de 0,8 Pa.s et 0,9 Pa.s.

Les Figures 4.14 et 4.15 comparent les courbes d'écoulement et de viscosité des remblais Doyon à 70% solide avec 4,5% CP et CP-SG mesurées sur les deux appareils aux âges de 10 min, 2h et 4h. Les faibles différences observées sur ces figures entre les courbes d'écoulement et de viscosité obtenues pour les deux géométries peuvent être attribuées à la légère variation de la densité des remblais dues aux variations des paramètres d'entrée pour le calcul de la recette, à savoir la teneur en eau initiale et la densité relative des résidus de différents batchs utilisés pour chaque recette. Aussi, la différence de la température des matériaux (20°C pour AR 2000 et autour de 25°C pour le ConTec) durant les essais, peut être également une cause de ces différences au niveau des valeurs des paramètres rhéologiques. Il ressort alors que les essais, pour être véritablement comparables dans le temps, doivent être réalisés sur des recettes dont les résidus sont échantillonnés dans les mêmes conditions et les mesures réalisées dans les mêmes conditions ambiantes au regard de l'effet de la température non négligeable sur l'évolution des matériaux cimentaires d'une part et sur les paramètres rhéologiques d'autre part.

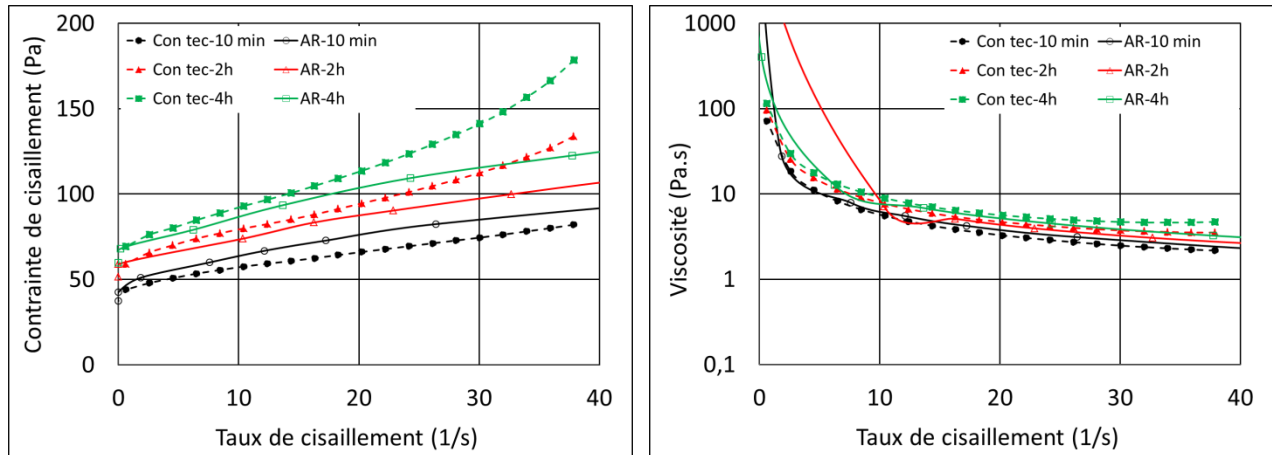


Figure 4.14: Comparaison des courbes d'écoulement et de viscosité obtenues avec les deux types d'appareils AR 2000 et ConTec sur le remblai Doyon à 70% Solide@4,5% CP aux âges de 10 minutes, 2h et 4h.

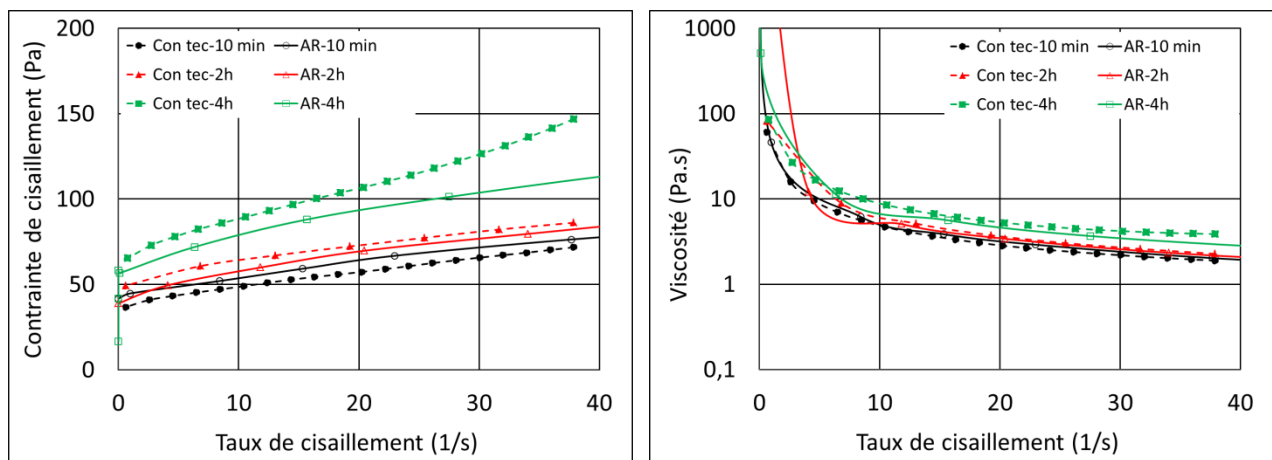


Figure 4.15: Comparaison des courbes d'écoulement et de viscosité obtenues avec les deux types d'appareils AR 2000 et ConTec sur le remblai Doyon à 70% Solide@4,5% CP-SG aux âges de 10 minutes, 2h et 4h.

➤ **Pour les résidus LaRonde**

Une comparaison des courbes d'écoulement et de viscosité obtenues par les deux types d'appareils a aussi été réalisée pour les résidus LaRonde. Les résultats de cette comparaison sont présentés en annexe 4. Les valeurs de seuil de cisaillement, de la viscosité et des autres paramètres obtenus à la suite des ajustements des courbes mesurées par le rhéomètre AR 2000 et le viscosimètre ConTec, en utilisant les équations de Herschell-Bulkley, Casson et de Bingham, sont comparées dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5: Comparaison des paramètres rhéologiques obtenus par le rhéomètre AR 2000 et le viscosimètre ConTec pour les remblais LaRonde à 70 % de solides et 4,5 % de liant à 70% S et 4,5% liant (CP et CP-SG).

Paramètres	Recettes					
	0 % de liant		4,5 % de CP10		4,5 % de CP-SG	
	AR 2000	ConTec	AR 2000	ConTec	AR 2000	ConTec
$\rho_{\text{mesuré}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,968	1,967	1,972		1,974	
$\rho_{\text{calculé}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,986		1,973		1,973	
Modèle de Herschell-Bulkley						
Seuil de cisaillement (Pa)	24,8	23,4	34,3	39	32,7	37,9
Consistance $K_{\text{HB}} \text{ (Pa.s}^n\text{)}$	1,98	4,5	1,15	1,5	1,2	4,4
Index n	0,47	0,29	0,76	0,6	0,79	0,39
Casson						
Seuil de cisaillement (Pa)	24,9	26,9	32,6	38,2	31	41,4
Consistance $K_{\text{C}} \text{ (Pa.s)}$	0,03	0,02	0,06	0,03	0,06	0,04
Modèle de Bingham						
Seuil de cisaillement (Pa)	25,5	29,3	35,8	41,1	33,8	44,2
Viscosité Plastique $\eta_{\text{B}} \text{ (Pa.s)}$	0,3	0,21	0,46	0,32	0,45	0,35

Les courbes rhéologiques d'autres recettes de résidus LaRonde épaissis à 70% et 75% de solides et de remblais à 70%S@4,5% de liant CP et CP-SG ont fait également l'objet de comparaison dans cette étude et les résultats sont présentés à l'annexe 4.

4.1.6 Récapitulatifs

Les résultats de validation des procédures obtenus sur des remblais en pâte avec 70 % de solides nous conduisent à considérer que la géométrie des plaques parallèles avec le stator rugueux est bien adaptée. De plus, les trois procédures de cisaillement (*continuous ramp*, *steady state step*, et *stepped flow step*) sont toutes adéquates pour la réalisation des tests. Cependant, compte tenu de la spécificité du remblai (matériau cimentaire à évolution plus ou moins rapide de la microstructure) et de l'influence des facteurs externes, tels que la température, il est souhaitable de s'orienter vers des tests rapides et représentatifs. Ainsi, la procédure de *continuous ramp* semble bien répondre à cet impératif, car il assure des résultats représentatifs dans des intervalles de temps de quelques minutes. Il faut aussi mentionner que les courbes d'écoulement utilisées pour les ajustements aux différents modèles rhéologiques en vue de l'obtention des valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité, sont les courbes descendantes, car elles sont plus lisses et débarrassées des artefacts de mise en place.

4.2 Résultats des mesures rhéologiques sur les recettes de la mine Doyon

Cette section présente les résultats des mesures rhéologiques effectuées principalement par le rhéomètre AR 2000 sur les résidus épaissis et les remblais fabriquées à partir des résidus provenant de la mine Doyon, selon diverses recettes telles que présentées dans la partie méthodologie (chapitre 3). Les résultats de quelques recettes notamment celles de résidus épaissis à un pourcentage de solides de 70% et de remblais ayant 70% de solides et 4,5% de liant CP10, 20CP/80Slag, 20CP/80Cendres Volantes (CV) et 20CP/80filaires calcaires (FC) obtenus sur le viscosimètre Con Tec seront également présentés. Les courbes brutes ont, dans un premier temps,

été traitées et l'interprétation de ces courbes a consisté à l'ajustement des courbes corrigées aux modèles rhéologiques. Les valeurs des paramètres rhéologiques obtenues à la suite de cette étape de l'interprétation ont été reportées, pour être analysées au chapitre suivant en termes de leur évolution dans le temps, en fonction du pourcentage solide, de la proportion et du type de liant.

4.2.1 Résultats des essais sur les résidus épaissis

Les résidus simplement épaissis aux pourcentages solides massiques de 65%, 70%, 72,5% et 75% ont été soumis à des cisaillements selon la procédure du *continuous ramp step*. Les rhéogrammes obtenus pour ces pourcentages de solides des résidus épaissis sont présentés sur la Figure 4.16. Il s'agit des courbes d'écoulement obtenues juste après l'ajout de l'eau et après un malaxage d'environ 5 minutes car les essais préliminaires ont indiqué qu'en absence de liant les paramètres rhéologiques connaissent une très faible variation comme indiqué sur les ajustements des courbes des résidus épaissis à 70 et 72,5% aux âges de 10 min, 1h, 2h et 4h à l'annexe 4.

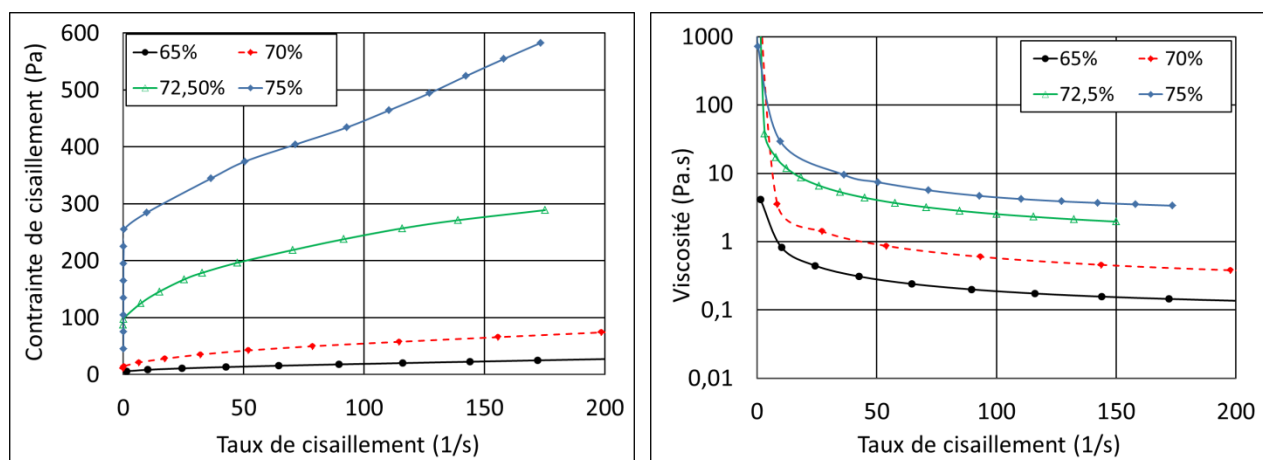


Figure 4.16: Courbes écoulement et de viscosité de résidus épaissis à 65%, 70, 72,5% et 75% solides.

Les paramètres de chaque modèle sont donnés au Tableau 4.6. Le seuil de cisaillement obtenu par ajustement au modèle de Herschell Bulkley pour les résidus épaissis à 65% de solide, est de 4,1 Pa, avec une consistance K de 1,05 Pa.s et un indice n de taux de cisaillement de 0,57. Avec l'ajustement au modèle de Casson, le seuil de cisaillement est de 9 Pa avec une viscosité de Casson de 0,044 Pa.s. Quant à l'ajustement au modèle de Bingham, il donne un seuil de cisaillement de 6,7 Pa et une viscosité plastique de Bingham de 0,113 Pa.s.

Les seuils de cisaillement obtenus suite à l'ajustement de la courbe des résidus de la mine Doyon épaissis à 70 % de solides aux trois modèles (Herschell-Bulkley, Casson et Bingham) sont respectivement de 11,61, 14,36 Pa et 20,18 Pa. Les autres paramètres du modèle de Herschell-Bulkley à savoir la consistance K et l'indice du taux de cisaillement sont de de 3,64 Pa.s et 0,53. La viscosité selon le modèle de Casson est de 0,12 Pa.s tandis que la viscosité plastique de Bingham est de 0,3 Pa.s. L'ajustement de la courbe de viscosité a permis d'obtenir une viscosité de de 0,27 Pa.s au taux de cisaillement infini avec le modèle de Sisko et Cross.

Pour la recette à 72,5 % de solide, on remarque une légère hausse de la courbe d'écoulement et de viscosité. Le seuil de cisaillement est de l'ordre de 105,72 Pa pour une consistance de 9,04 Pa.s et un indice n de 0,61 du modèle de Herschell-Bulkley. Le seuil de cisaillement et la viscosité selon le modèle de Casson sont respectivement de 103,7 Pa et 0,33 Pa.s tandis que le modèle de Bingham enregistre 132,2 Pa et 1,18 Pa.s pour ces deux précédents paramètres. Les viscosités à l'infini des modèles de Sisko et de Cross donnent respectivement 0,61 et 0,62 Pa.s.

La courbe d'écoulement des résidus épaissis à 75 % de solides présente un seuil de cisaillement et une viscosité nettement plus élevés que ceux des recettes précédentes des résidus épaissis. Pour les trois modèles, le seuil de cisaillement est supérieur à 200 Pa. En effet, les différents ajustements donnent un seuil de cisaillement de 241,9 Pa, 215,9 et 258,5 Pa pour les modèles respectifs de Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham. La consistance (K) et l'indice du taux de cisaillement (n) dans le cas de Herschell-Bulkley sont de 5,58 Pa.s et 0,79. La viscosité de Casson et de Bingham sont respectivement de 0,463 Pa.s et 1,89 Pa.s.

Tableau 4.6 : Paramètres rhéologiques des résidus Doyon épaissis à 65%, 70%, 72,5% et 75 % de solides selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

Modèle de	paramètres	65%	70%	72,5%	75%
Herschell-Bulkley	Seuil (Pa)	4,11	11,61	105,7	241,9
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	1,05	3,64	9,04	5,58
	n_{HB}	0,57	0,536	0,61	0,79
	Erreur standard	13,63	8,63	3,08	16,97
Casson	Seuil (Pa)	9	14,36	103,1	215,9
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,044	0,122	0,330	0,463
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	5,5	28,11	5,94	26,04
Bingham	Seuil (Pa)	6,76	20,18	132,2	258,5
	η_B	0,113	0,30	1,18	1,89
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	63,83	79,8	39,79	24,9
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,094	0,278	0,709	1,1
	K_S (Pa.s ⁿ)	6,11	18,36	102,0	125,4
	n_S	0,088	0,066	0,125	0,028
	Erreur Standard	4,64	7,30	2,9	3,9
Cross	η_0 (Pa.s)	2,44 e7	2,24 e9	1,8 e5	6365
	η_∞ (Pa.s)	0,094	0,278	0,710	1,76
	k (s)	1,74 e7	4,63 e8	53,35	22,48
	m_{Cr}	0,91	0,93	0,875	1,0
	Erreur Standard	4,64	7,31	2,91	2,75

Ces résultats montrent que les paramètres rhéologiques des résidus simplement épaissis sont fonction du pourcentage de solides. Le seuil de cisaillement qui est en moyenne autour 5 Pa pour les résidus à 65 % de solides, de 12 Pa pour les résidus épaissis à 70 % de solides et de 100 Pa pour les résidus à 72,5 % de solides et atteint jusqu'à plus de 200 Pa pour les résidus à 75 % de solides. L'augmentation de la viscosité des résidus avec le pourcentage de solides est aussi à relever.

4.2.2 Résultats des paramètres rhéologiques sur des remblais

Dans un premier temps, les remblais à 70 % de solides ont été testés. Dans la suite, les mesures se sont limitées aux remblais à 72,5 % de solides car les résidus au fort pourcentage de solides (>72,5 % de solides) ou même les remblais à ce pourcentage de solides à des âges supérieurs à 2h, la mise en œuvre des mesures devient délicate et problématique. Cela étant dû d'une part, à la difficulté de la mise en place de l'échantillon sur la plaque inférieure car celui-ci ne s'écoule plus à cause de l'état pâteux monolithique et d'autre part, à l'augmentation de la force normale consécutive à l'abaissement du rotor pour atteindre l'ouverture prévue de l'entrefer. En effet, la plaque supérieure a tendance à provoquer une surpression sur l'échantillon qui ne s'ajuste plus à l'entrefer comme dans le cas des résidus à faible pourcentage de solides; ce qui se solde par l'application d'une contrainte normale très élevée qui ne permet aucun mouvement du rotor. Le principe de continuité qui sous-tend les mesures rhéologiques n'est plus véritablement respecté. Cet état de fait nous a fait recourir à la géométrie du moulinet pour réaliser les essais à des pourcentages de solides plus élevés. Si cette géométrie a pu néanmoins permettre d'effectuer des mesures sur les résidus épaissis à 75 % de solides, il est à relever que, tout comme pendant la phase de calibrage, l'influence du volume de l'échantillon à mettre dans le cylindre statique au cours des tests peut être considérable sur les résultats. De même, la pénétration du moulinet dans le matériau entraîne aussi de forte pression normale et une forte compression de l'échantillon de sorte à rendre les résultats douteux. Pour ces raisons, seuls les résultats des remblais aux pourcentages de solides de 70 % et 72,5 % de solides avec une proportion de 2, 4,5 et 6 % de liant seront présentés dans cette section.

4.2.2.1 Recettes de remblais à 70 % de solides

Les rhéogrammes obtenus suite à l'application des contraintes de cisaillement sur les recettes de remblais à 70 % de solides avec l'ajout de 2 %, 4,5 % et 6 % des liants de CP10 seul et de 20CP10/80Slag sont présentés respectivement sur les Figure 4.17, Figure 4.18 et Figure 4.23. Sur chaque figure, les courbes d'écoulement et de viscosité représentées correspondent aux essais à

des âges de 10 min, 1 h, 2 h et 4 h. Les paramètres rhéologiques évalués par ajustement des modèles rhéologiques aux courbes d'écoulement et de viscosité des remblais constitués de 70 % de solides et 2 % de liant CP10 seul aux âges de 10 min, 1 h, 2 h, et 4 h (voir Figure 4.17) ont donné pour les modèles rhéologiques de Herschell Bulkley, Casson, Bingham Sisko et Cross les valeurs indiquées sur les Tableau 4.7.

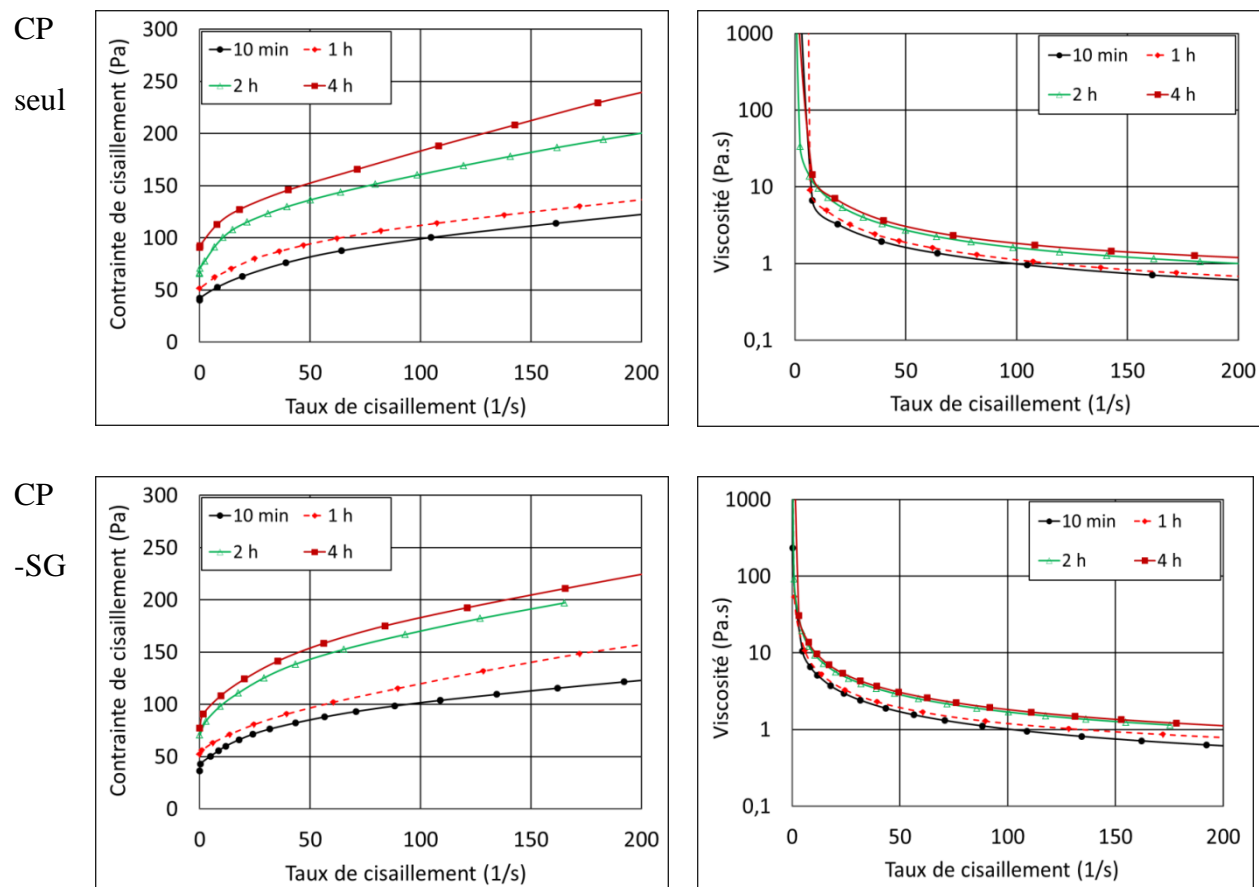


Figure 4.17: Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 70% solides et 2 % liant (en haut CP10 et en bas CP-SG)

Tableau 4.7 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% solides et 2% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

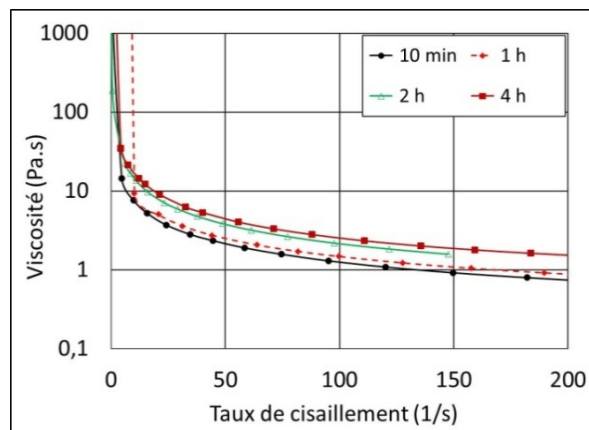
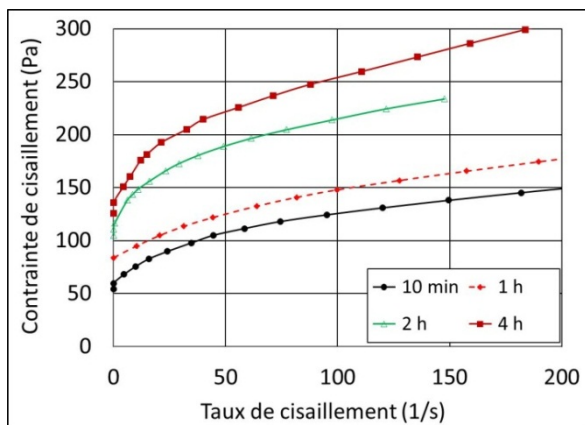
70%S @2% CP	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell-Bulkley	Seuil (Pa)	40,8	50,0	66,8	92,2
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	4,585	5,59	10,9	5,43
	n_{HB}	0,549	0,520	0,471	0,617
	Erreur standard	14,45	12,95	9,74	8,75
Casson	Seuil (Pa)	41,78	52,78	73,27	90,15
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,117	0,1065	0,169	0,171
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	19,96	19,06	24,65	8,655
Bingham	Seuil (Pa)	49,74	65,73	88,4	104,7
	η_B	0,451	0,424	0,662	0,737
	$n_B = 1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	72,25	58,74	71,0	44,45
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,112	0,107	0,213	0,462
	K_S (Pa.s ⁿ)	33,38	42,22	67,52	91,18
	n_S	0,208	0,189	0,159	0,089
	Erreur Standard	4,77	2,95	1,67	1,95
Cross	η_0 (Pa.s)	3,98	16480	11910	166,2
	η_∞ (Pa.s)	0,513	0,107	0,2153	0,529
	k (s)	3,096	1569	463,8	1,54
	m_{Cr}	0,960	0,810	0,842	0,959
	Erreur Standard	47,76	2,96	1,675	0,5852

Tableau 4.8 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% solides et 2% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@2% CP-SG	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell-Bulkley	Seuil (Pa)	36,38	52,21	69,44	72,92
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	8,49	3,744	10,06	12,47
	n_{HB}	0,441	0,630	0,499	0,471
	Erreur standard	12,58	2,78	9,11	12,54
Casson	Seuil (Pa)	43,88	50,18	75,05	80,27
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,113	0,150	0,1865	0,201
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	32,4	6,80	19,09	25,79
Bingham	Seuil (Pa)	55,35	62,13	92,75	97,75
	η_B	0,405	0,543	0,711	0,774
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	76,35	44,31	61,62	72,38
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,27	0,4	0,40	0,33
	K_S (Pa.s ⁿ)	47,19	54,44	76,1	78,14
	n_S	0,092	0,081	0,112	0,138
	Erreur Standard	8,78	5,06	8,78	4,77
Cross	η_0 (Pa.s)	3,25 e6	5,66 ^{e5}	9,49 e5	2,38 e5
	η_∞ (Pa.s)	0,270	0,34	0,403	0,33
	k (s)	2,15 e5	23490	41200	11080
	m_{Cr}	0,90	0,919	0887	0,861
	Erreur Standard	8,78	5,07	6,42	4,78

Les courbes d'écoulement des remblais Doyon à 70% de solides et 4,5 % de liant CP 10 et CP-SG sont présentées sur la Figure 4.18 et les paramètres rhéologiques des ajustements aux modèles respectifs de Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de sisko et Cross sont affichées sur les Tableau 4.9. Quant au remblai au même pourcentage solide et de liant CP-SG, les paramètres des modèles d'ajustement utilisés sont répertoriés dans le Tableau 4.10.

CP



CP

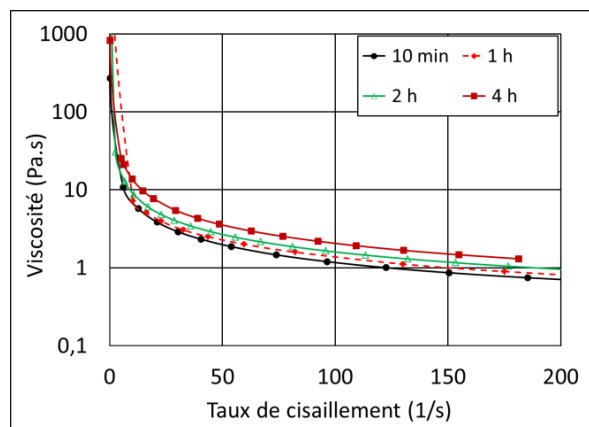
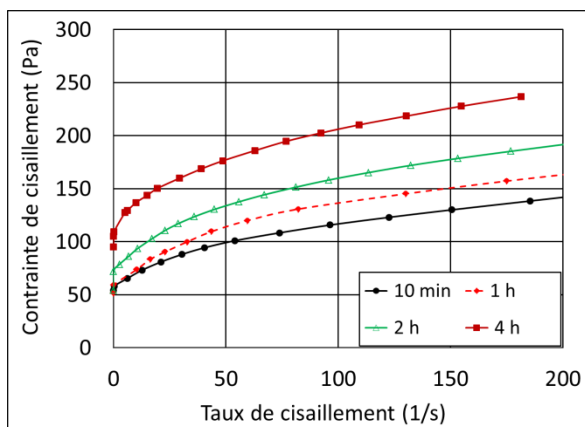
-
SG

Figure 4.18 : Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 70% solide et 4,5 % liant (en haut CP10 et en bas CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, 2h et 4h.

Tableau 4.9 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70%S @ 4,5% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@4,5% CP	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	55,42	81,9	104,9	129,0
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	7,73	4,04	16,44	14,05
	n_{HB}	0,47	0,60	0,41	0,477
	Erreur standard	15,83	11,03	8,44	11,33
Casson	Seuil (Pa)	60,12	80,10	114,0	136,8
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,113	0,09	0,165	0,1793
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	26,7	13,87	28,03	18,85
Bingham	Seuil (Pa)	72,7	96,14	130,6	160,9
	η_B	0,47	0,46	0,84	0,85
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	71,16	40,68	72,77	57,5
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,104	0,176	0,365	0,258
	K_S (Pa.s ⁿ)	50,28	65,46	119,0	122,2
	n_S	0,178	0,147	0,087	0,137
	Erreur Standard	4,50	3,21	3,58	2,07
Cross	η_0 (Pa.s)	33730	20730	2,48 e6	1229
	η_∞ (Pa.s)	0,105	0,176	0,365	0,290
	k (s)	2755	855,9	54490	13,34
	m_{Cr}	0,821	0,852	30,912	0,875
	Erreur Standard	4,51	3,22	3,58	1,99

Tableau 4.10 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% de solides et de 4,5% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@4,5% CP-SG	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	53,16	53,78	61,60	101,0
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	6,08	7,874	11,68	12,82
	n_{HB}	0,507	0,505	0,460	0,455
	Erreur standard	11,87	23,58	19,33	8,82
Casson	Seuil (Pa)	56,3	58,05	70,25	108,4
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,105	0,154	0,174	0,150
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	17,83	32,32	31,7	20,49
Bingham	Seuil (Pa)	68,2	72,2	87,5	126,4
	η_B	0,435	0,570	0,657	0,719
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	60,31	80,4	73,71	62,20
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,318	3,87 e-7	0,241	0,479
	K_S (Pa.s ⁿ)	61,73	39,2	64,45	118,9
	n_S	0,063	0,270	0,159	0,057
	Erreur Standard	7,30	4,76	6,042	4,301
Cross	η_0 (Pa.s)	7,31 e6	149,5	1,2 e5	1,52 e7
	η_∞ (Pa.s)	0,318	7,281 e-5	0,241	0,479
	k (s)	2,60 e5	5,47	8202	2,6 e5
	m_{Cr}	0,937	0,744	0,841	0,943
	Erreur Standard	7,30	4,80	6,05	4,30

Les courbes d'écoulement et de viscosité aux âges de 10 minutes, 2h et 4h pour les recettes de 70%S@4,5% CP, CP-SG, CP-CV, et CP-FC produites avec le viscosimètre ConTec dans la phase de validation sont présentées respectivement aux Figures 4.19, 4.20, 4.21 et 4.22.

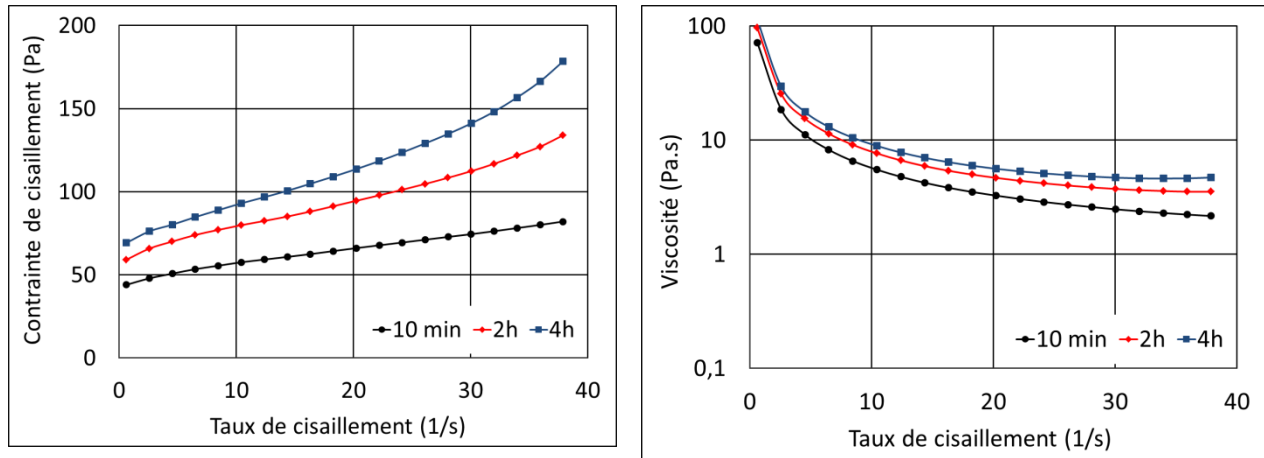


Figure 4.19: Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70% solide @4,5%CP aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.

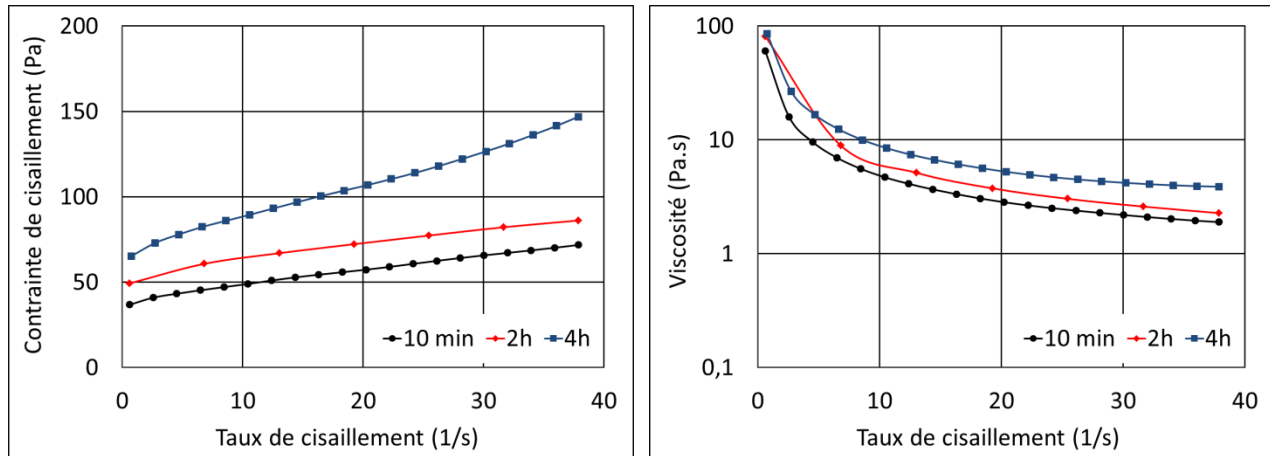


Figure 4.20 : Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70 % de solides et 5 % CP-SG aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.

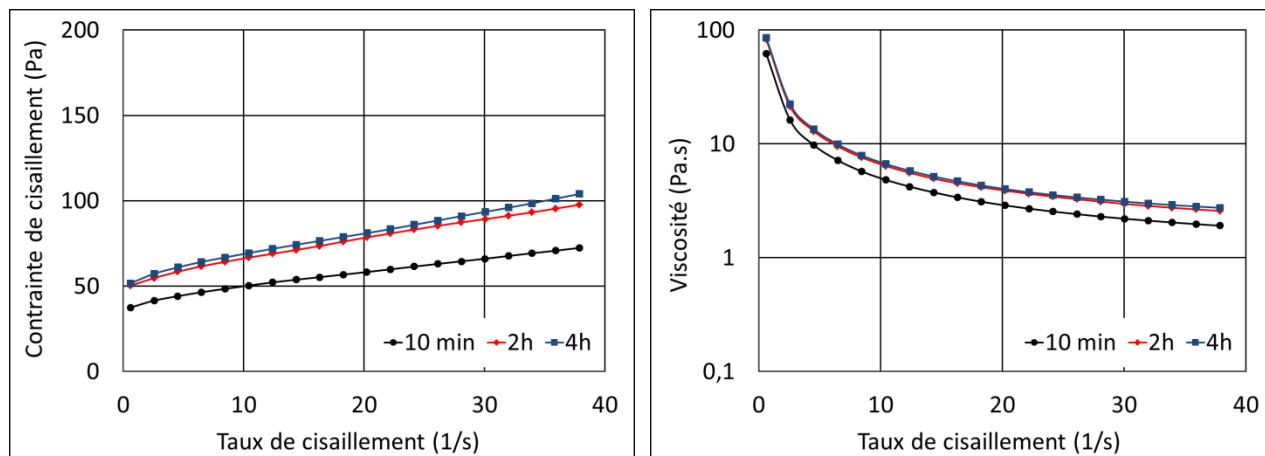


Figure 4.21 : Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70 % de solides et 5 % CP-CV aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.

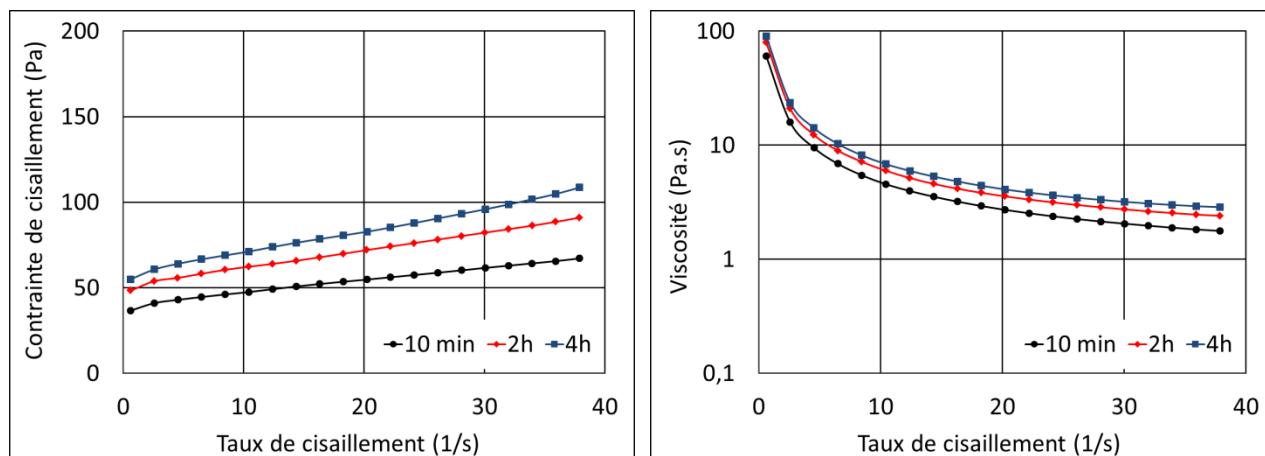
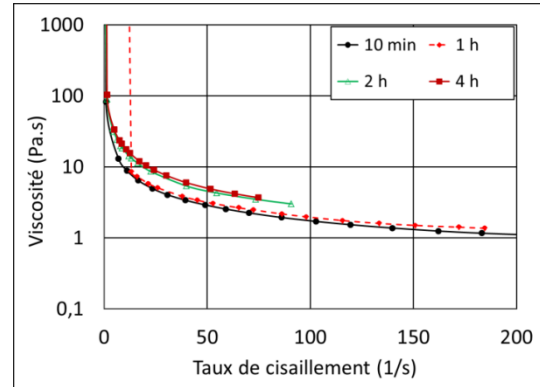
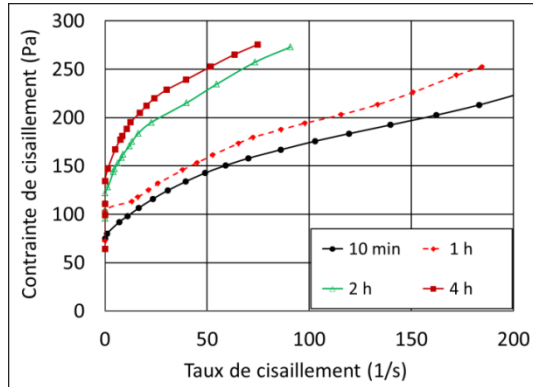


Figure 4.22 : Courbes d'écoulement et de viscosité du remblai Doyon à 70 % de solides et 4,5% CP-FC aux âges de 10 minutes, 2h et 4h avec le viscosimètre ConTec.

La Figure 4.23 présente les courbes d'écoulement des remblais Doyon à 70 % de Solide et 6 % de liant CP 10 et CP-SG. Les paramètres rhéologiques des ajustements aux modèles respectifs de Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de sisko et Cross sont affichés sur le Tableau 4.11 pour les remblais à CP10 et le Tableau 4.12 pour les remblais à CP-SG.

CP



CP-SG

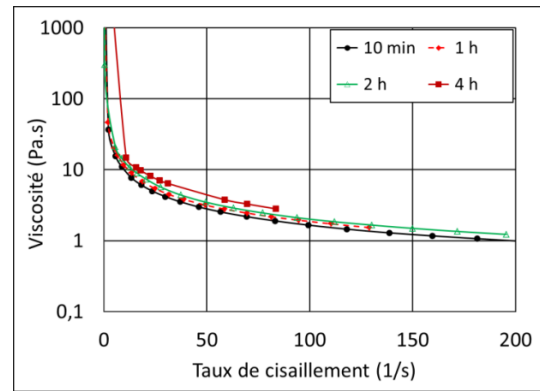
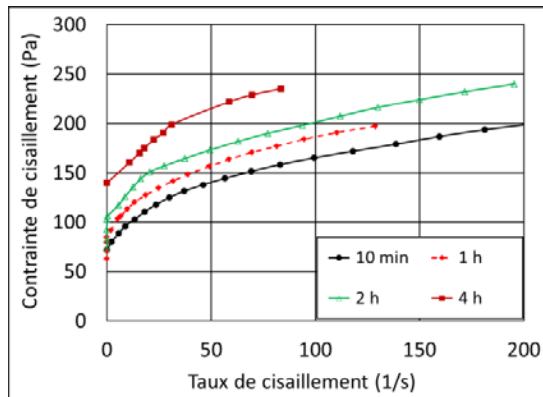


Figure 4.23 : Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 70% de solides et 6 % liant (en haut CP10 et en bas CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, 2h et 4h

Tableau 4.11 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% de solides et 6% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@6% CP	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	72,0	87	108,2	130,4
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	7,81	5,45	18,82	18,65
	n_{HB}	0,5563	0,650	0,480	0,479
	Erreur standard	10,59	24,39	18,85	10,8
Casson	Seuil (Pa)	74,34	82,44	114,4	138,20
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,202	0,241	0,40	0,34
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	15,03	26,07	25,47	17,10
Bingham	Seuil (Pa)	95,3	106,6	133,6	164,1
	η_B	0,71	0,835	1,76	1,71
	$n_B = 1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	51,60	44,95	67,38	50,52
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,483	0,374	0,737	0,625
	K_S (Pa.s ⁿ)	76,23	65,33	119,9	137,6
	n_S	0,104	0,193	0,121	0,119
	Erreur Standard	7,703	6,556	3,275	3,521
Cross	η_0 (Pa.s)	1,23 e6	281,0	5,24 e5	4,62 e5
	η_∞ (Pa.s)	0,483	0,40	0,738	0,627
	k (s)	50210	5,36	13910	10140
	m_{Cr}	0,895	0,824	0,878	0,880
	Erreur Standard	7,704	6,559	3,277	3,525

Tableau 4.12 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 70% de solides et 6% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@6% CP-SG	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	67,03	73,55	97,18	138,1
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	11,58	14,36	11,5	6,1
	n_{HB}	0,463	0,447	0,478	0,63
	Erreur standard	13,54	17,6	10,25	14,6
Casson	Seuil (Pa)	76,87	81,33	103,7	133,3
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,161	0,225	0,155	0,177
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	25,35	29,64	18,96	18,12
Bingham	Seuil (Pa)	96,33	97,35	123,0	153,2
	η_B	0,622	0,948	0,691	1,090
	$n_B = 1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	62,23	71,8	59,49	32,71
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,207	0,353	0,438	1,21 e-5
	K_S (Pa.s ⁿ)	67,33	81,59	109,8	101,0
	n_S	0,164	0,134	0,073	0,191
	Erreur Standard	5,14	3,70	5,56	3,89
Cross	η_0 (Pa.s)	1,78 e5	89070	6,180 ^e 6	5655
	η_∞ (Pa.s)	0,207	0,353	0,438	3,576 e-4
	k (s)	12500	3213	1,342 e5	143,6
	m_{Cr}	0,835	0,866	0,926	0,809
	Erreur Standard	5,144	3,715	5,56	3,90

En analysant les résultats des propriétés rhéologiques obtenus pour les différentes recettes de remblais, il ressort de prime abord que les paramètres rhéologiques des remblais à base de CP semblent plus élevés que ceux des remblais à base de CP-SG pour un même pourcentage de liant donné et cela à tous les âges. Si cette tendance à la hausse est relativement faible avec les liants à 2%, elle est plus marquée avec les pourcentages élevés de liant soit pour 4,5% et 6% de liant.

4.2.2.2 Recettes de remblais à 72,5 % de solides

La Figure 4.24 présente les courbes d'écoulement des remblais Doyon à 72,5% de Solide et 2% de liant CP 10 et CP-SG. Les paramètres rhéologiques des ajustements aux modèles respectifs de Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de sisko et Cross sont affichés sur le Tableau 4.13.

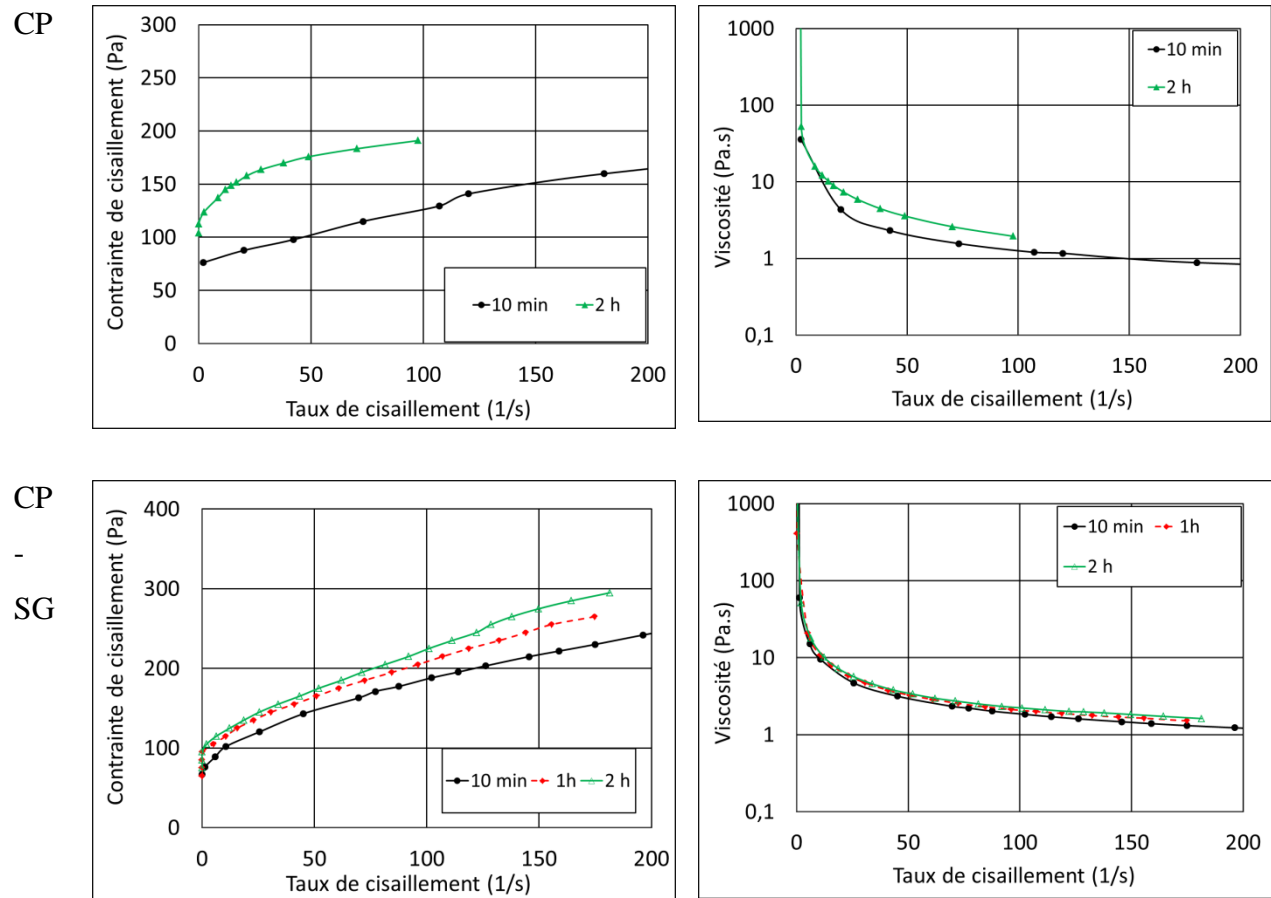


Figure 4.24: Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 72,5% de solides et 2 % liant aux âges de 10 minutes, 1h et 2h

Tableau 4.13 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 2% liant (CP et CP-SG) selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

72,5%S@2% CP et CP-SG	paramètres	10min		1h	2h	
		CP	CP-SG	CP-SG	CP	CP-SG
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	73,36	66,67	79,57	107,4	88,38
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	1,19	8,74	8,18	14,38	5,95
	n_{HB}	0,82	0,56	0,60	0,39	0,68
	Erreur standard	15,25	3,8	19,1	16,18	15,84
Casson	Seuil (Pa)	62,06	69,45	78,9	114,9	81,5
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,121	0,2746	0,314	0,121	0,36
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	27,81	10,37	17,31	30,05	16,08
Bingham	Seuil (Pa)	78,06	91,4	98,86	129,1	105,7
	η_B	0,477	0,85	1,050	0,79	1,14
	$n_B = 1$	1	1	1	1	1
	Erreur Standard	21,8	51,5	50,88	68,02	37,8
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,44	0,53	0,84	0,11	0,90
	K_S (Pa.s ⁿ)	73,85	71,18	98,84	110,8	97,18
	n_S	0,02	0,1315	0,046	0,107	0,06
	Erreur Standard	5,56	5,12	4,12	3,82	2,77
Cross	η_0 (Pa.s)	2,89 e5	3,9 e5	9,15 e6	2,80 e5	2,531 e5
	η_∞ (Pa.s)	0,44	0,53	0,84	0,11	0,90
	k (s)	4745	20550	1,62	6524	4650
	m_{Cr}	0,977	0,86	0,95	0,89	0,931
	Erreur Standard	5,56	5,12	4,12	3,83	2,77

Les courbes d'écoulement des remblais Doyon à 72,5% de Solide et 4,5 % de liant CP 10 et CP-SG sont présentées à la Figure 4.25 et les paramètres rhéologiques des ajustements aux modèles respectifs de Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de sisko et Cross sont affichées aux Tableau 4.14 et Tableau 4.15.

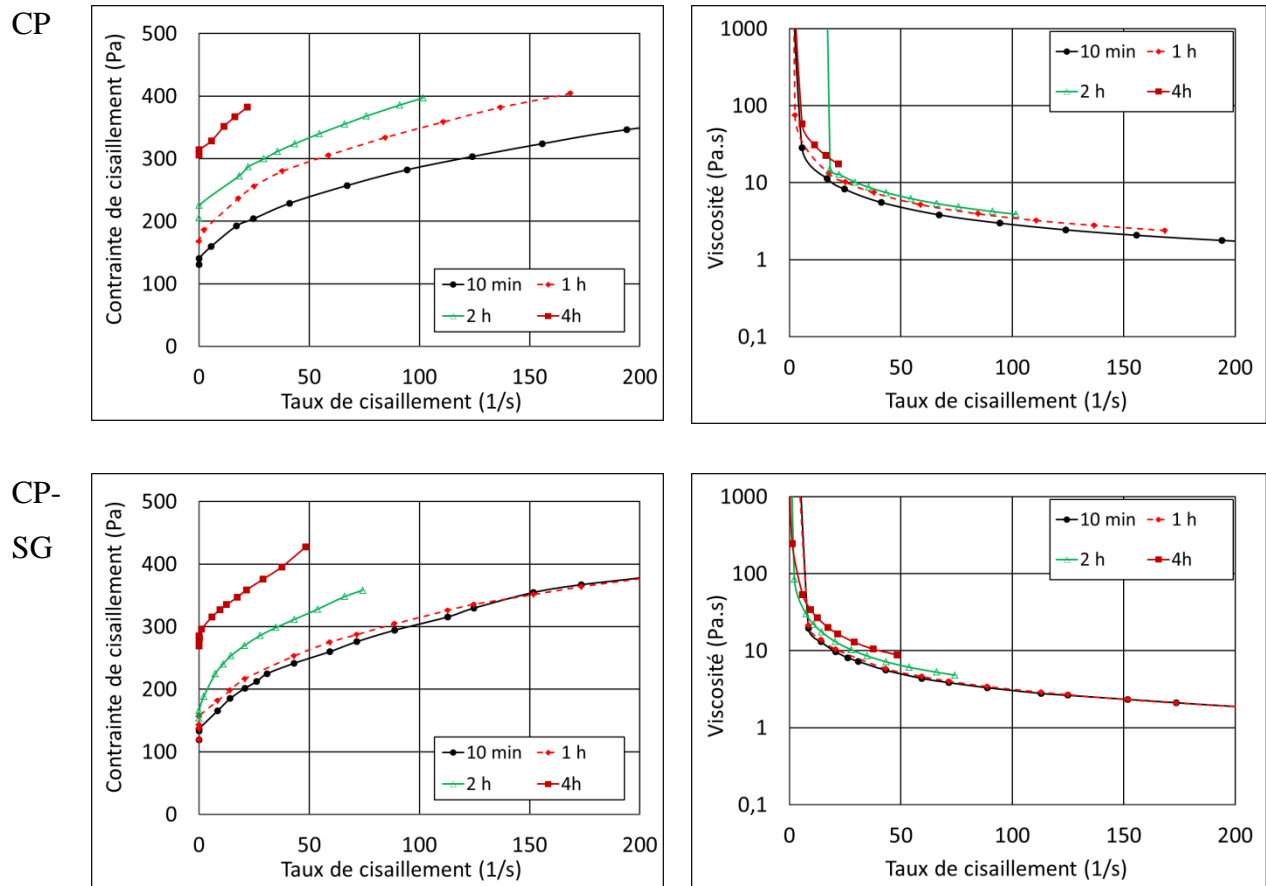


Figure 4.25 : Courbes écoulement et de viscosité de remblais à 72,5% de solides et 4,5 % liant aux âges de 10 minutes, 1h, 2h et 4h.

Tableau 4.14 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 4,5% CP selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

72,5%S@4,5% CP	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	134,0	164,3	214,9	309,2
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	12,63	16,94	10,19	4,394
	n_{HB}	0,537	0,518	0,625	0,915
	Erreur standard	9,75	7,48	11,95	7,72
Casson	Seuil (Pa)	137,4	171,0	210,6	306,9
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,257	0,308	0,282	0,156
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	14,3	14,07	14,8	19,06
Bingham	Seuil (Pa)	163,3	206,3	236,3	309,8
	η_B	1,068	1,318	1,739	3,417
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	60,44	57,48	36,96	8,319
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,419	0,643	0,577	1,645
	K_S (Pa.s ⁿ)	121,0	164,8	173,8	287,7
	n_S	0,150	0,117	0,143	0,060
	Erreur Standard	2,57	3,60	2,91	0,172
Cross	η_0 (Pa.s)	68390	4,254	94,73	1,00°35
	η_∞ (Pa.s)	0,420	0,643	1,079	1,123
	k (s)	1734	7302	0,312	6,29°32
	m_{Cr}	0,85	0,883	1,0	0,990
	Erreur Standard	2,57	3,606	2,359	0,385

Tableau 4.15 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 4,5% CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

72,5%S@4,5% CP-SG	paramètres	10min	1h	2h	4h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	128,8	138,0	162,5	278,5
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	13,16	16,74	23,53	10,10
	n_{HB}	0,56	0,509	0,4927	0,683
	Erreur standard	12,11	22	13,59	11,35
Casson	Seuil (Pa)	131,0	143,1	167,1	273,0
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,359	0,319	0,517	0,30
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	14,32	27,01	19,27	16,08
Bingham	Seuil (Pa)	160,3	165,5	188,1	287,1
	η_B	1,354	1,343	2,644	3,044
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	58,05	71,1	64,29	22,55
Sisko	η_∞ (Pa.s)	1,164	1,041	0,750	2,24
	K_S (Pa.s ⁿ)	165,1	179,0	167,6	291,2
	n_S	0,238	0,027	0,136	0,020
	Erreur Standard	2,87	3,51	1,30	0,873
Cross	η_0 (Pa.s)	449,4	34380	40830	65450
	η_∞ (Pa.s)	0,53	0,30	0,759	2,33
	k (s)	4,96	1092	575,6	242,2
	m_{Cr}	0,833	0,984	0,864	0,984
	Erreur Standard	2,9	2,75	1,31	0,750

Les courbes d'écoulement des remblais Doyon à 72,5% de solide et 6 % de liant CP 10 et CP-SG sont présentées à la Figure 4.26 et les paramètres rhéologiques des ajustements aux modèles respectifs de Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de sisko et Cross sont affichées au Tableau 4.16.

CP

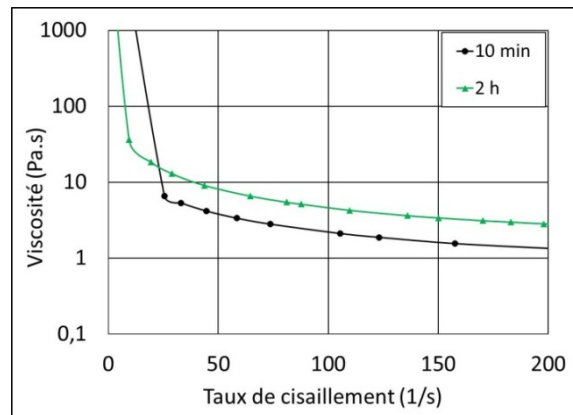
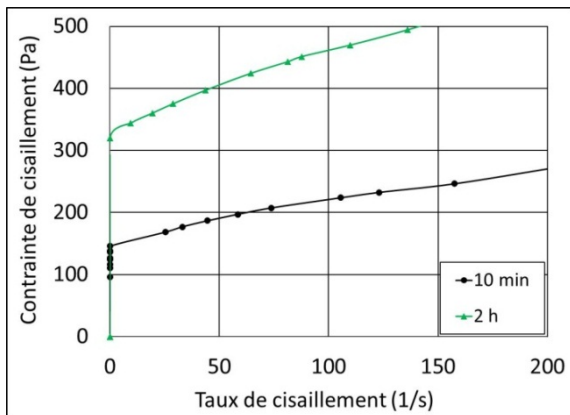
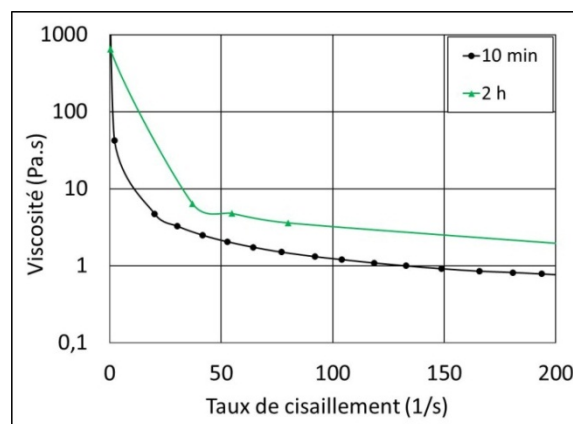
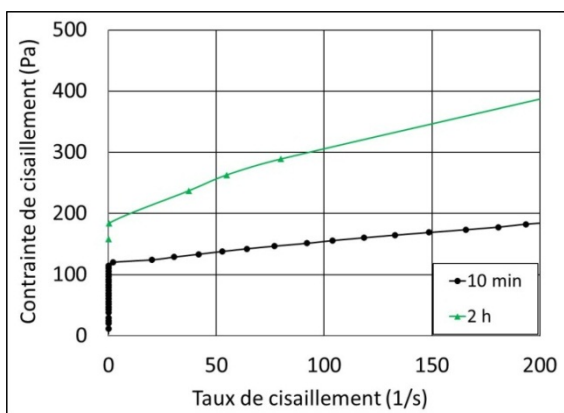
CP-
SG

Figure 4.26 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais à 72,5% de solides et 6 % liant aux âges de 10 minutes et 2h.

Tableau 4.16 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 72,5% de solides et 6% liant (CP10 et CP-SG) selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

72,5%S@6% Liant (CP et CP-SG)	paramètres	10min		2h	
		CP	CP-SG	CP	CP-SG
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	131,9	105,2	320	182,5
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	5,9	2,36	4,33	8,76
	n_{HB}	0,59	0,65	0,75	0,59
	Erreur standard	10,58	8,58	4,63	5,26
Casson	Seuil (Pa)	129,9	102,5	295	178,7
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,118	0,05	0,19	0,19
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	12,21	14,18	17,51	6,82
Bingham	Seuil (Pa)	145,3	112,5	239,2	210,5
	η_B	0,72	0,38	1,15	1,02
	$n_B=1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	44,21	27,43	15,48	41,11
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,56	0,247	1,09	0,76
	K_S (Pa.s ⁿ)	153	99,34	336,0	197,6
	n_S	0,012	0,059	7,3 e-3	0,041
	Erreur Standard	1,16	0,83	1,03	2,42
Cross	η_0 (Pa.s)	1,74 e9	265,5	5,13 e 9	2,17 e6
	η_∞ (Pa.s)	0,57	0,26	1,094	0,76
	k (s)	1,32 e7	2,59	1,72 e 7	16470
	m_{Cr}	0,99	0,95	0,99	0,95
	Erreur Standard	0,96	0,78	1,039	2,42

Les mesures réalisées avec la géométrie de plaques parallèles ont donné des résultats probants pour les pourcentages solides compris entre 65%S, 70% et 72,5% mais difficilement à 75% solides pour les résidus Doyon.

4.2.2.3 Recettes de remblais à 75 % de solides

La géométrie de moulinet a été utilisée en partie pour obtenir quelques résultats sur les remblais à 75% de solide et 6% de liant CP-SG. Les courbes d'écoulement à 10 min et 2h sont présentées à la Figure 4.27 tandis que les paramètres d'ajustement de ces courbes aux modèles Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de Sisko et Cross sont indiqués sur le Tableau 4.17.

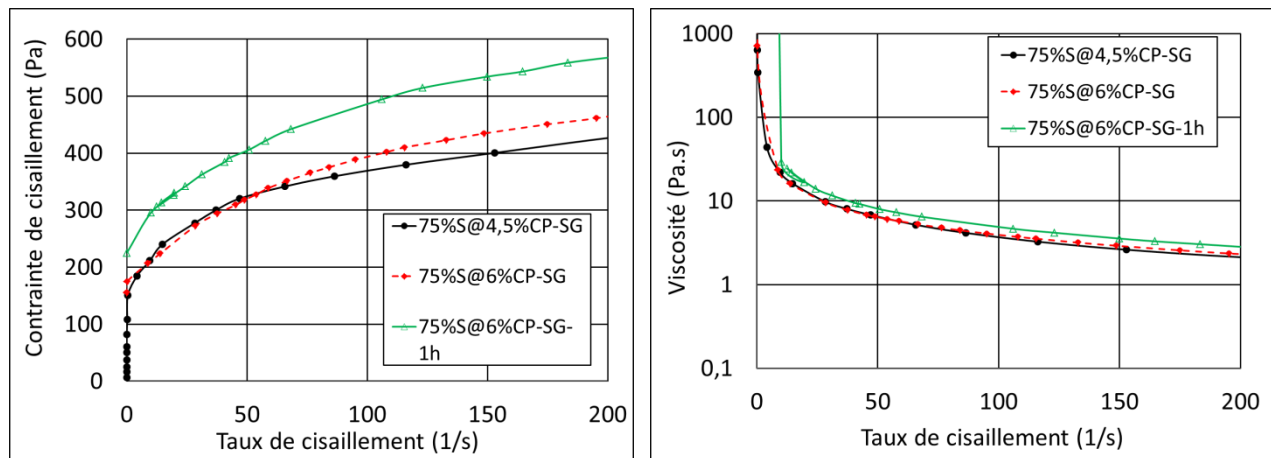


Figure 4.27 : Quelques résultats de remblais de la mine Doyon à 75% de solides et 4,5 et 6%CP-SG avec la géométrie de moulinet aux âges de 10 minutes, et 2h.

Tableau 4.17 : Paramètres rhéologiques du remblai Doyon à 75% de solides et 6% de liant CP-SG selon les modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

75%S@6% CP-SG	paramètres	75%S@6% CP-SG-10 min	75%S@6% CP-SG-2h
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	148,6	213,3
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	29,46	31,35
	n_{HB}	0,450	0,45
	Erreur standard	17,79	15,15
Casson	Seuil (Pa)	185,5	248,1
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,327	0,335
	$n_C=0,5$	0,5	0,5
	Erreur Standard	32,81	25,49
Bingham	Seuil (Pa)	244,4	312,8
	η_B	1,118	1,31
	$n_B=1$	1	1
	Erreur Standard	71,01	57,03
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,754	0,203
	K_S (Pa.s ⁿ)	185,9	179,0
	n_S	0,102	0,204
	Erreur Standard	9,54	5,51
Cross	η_0 (Pa.s)	1,09 e7	1,09 e5
	η_∞ (Pa.s)	0,755	0,204
	k (s)	2,06 e5	3178
	m_{Cr}	0,897	0,796
	Erreur Standard	9,54	5,51

4.3 Résultats des mesures rhéologiques sur les recettes de la mine LaRonde

4.3.1 Résultats des essais sur les résidus épaissis

Les courbes d'écoulement et de viscosité obtenues avec les résidus laRonde épaissis à 65%, 70%, 72,5 et 75% solide sont présentées sur la Figure 4.28 et les paramètres rhéologiques associés aux modèles d'ajustement de ces courbes sont indiqués au Tableau 4.18. La courbe d'écoulement à 65% solide est presque newtonienne avec un très faible seuil de cisaillement de l'ordre de 1 Pa selon le modèle Herschell Bulkley. Les paramètres rhéologiques découlant de l'interprétation des courbes de la recette à 70% S ont donné 7,8 Pa avec une viscosité de 0,1612 Pa.s. Pour les résidus épaissis à 72,5%S et 75%, le seuil de cisaillement et la viscosité enregistrés sont respectivement de 158 Pa et de 0,41 Pa.s.

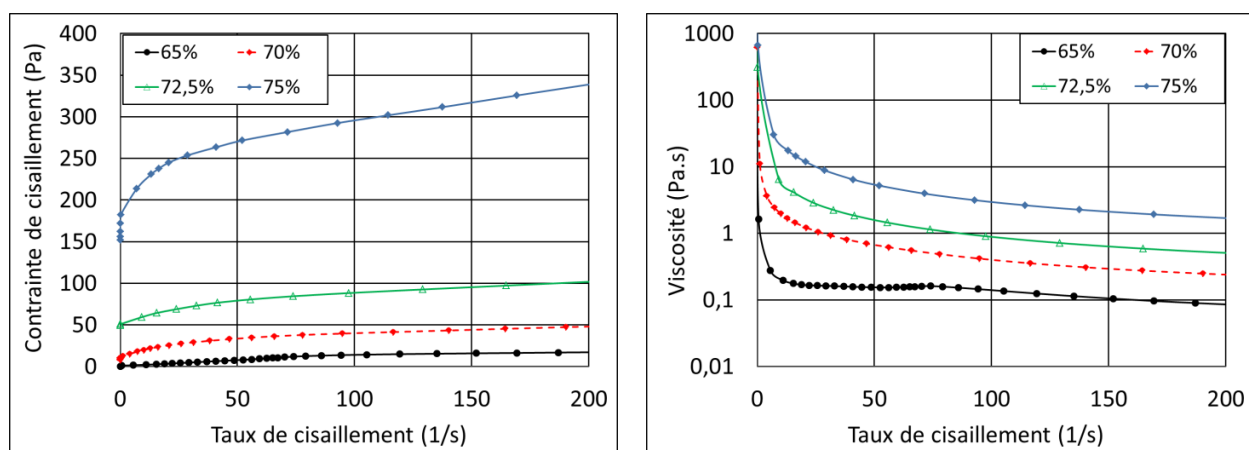


Figure 4.28 : Courbes d'écoulement et de viscosité des résidus LaRonde épaissis à 65%S, 70%S, 72,5% et 75% de solides.

Tableau 4.18 : Paramètres rhéologiques des résidus LaRonde épaissis à 65%, 70%, 72,5%S et 75% de solides selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

Résidus épaissis	Paramètres	65%	70%	72,5%	75%
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	0,74	7,86	49,5	158
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	0,09	4,63	4,38	32,87
	n_{HB}	1,1	0,41	0,47	0,31
	Erreur standard	12,78	27,7	14,5	11,29
Casson	Seuil (Pa)	0,03	12,07	51,27	176,6
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,14	0,075	0,05	0,159
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	22,61	65,5	21	43,3
Bingham	Seuil (Pa)	0,44	16,10	57,86	196,3
	η_B	0,14	0,21	0,28	0,93
	$n_B = 1$	1	1	1	1
	Erreur Standard	16,92	120,8	63,15	85,4
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,138	1,02 e-6	0,17	0,352
	K_S (Pa.s ⁿ)	0,81	9,07	54,96	195
	n_S	1,30 e-7	0,31	0,05	0,06
	Erreur Standard	20,73	10,15	5,6	2,75
Cross	η_0 (Pa.s)	2,0	1,39 e7	5,67e7	1,39 e7
	η_∞ (Pa.s)	0,155	1,74 e5	0,175	0,35
	k (s)	0,77	2,04	1,96 e5	1,5 e5
	m_{Cr}	1,74	0,72	0,94	0,93
	Erreur Standard	6,14	6,27	5,59	2,76

4.3.2 Résultats des essais sur les remblais laRonde

Les courbes d'écoulement des remblais fabriqués à partir des résidus laRonde selon les pourcentages solide de 70% et à différents pourcentages de liant de 2%, 4,5% et 6% sont présentées sur les Figure 4.29 à Figure 4.31. Sur chaque figure, les courbes d'écoulement et de viscosité représentées correspondent aux essais à des âges de 10mn, 1h et 2h. Les paramètres d'ajustement aux modèles Herschell-Bulkley, Casson, et Bingham, de sisko et Cross des courbes d'écoulement et de viscosité des recettes de remblais laRonde à 70% de solide et 2%, 4,5% et 6% de liant CP10seul et CP10-SG sont répertoriés aux Tableaux 4.20, 4.21 et 4.22.

CP

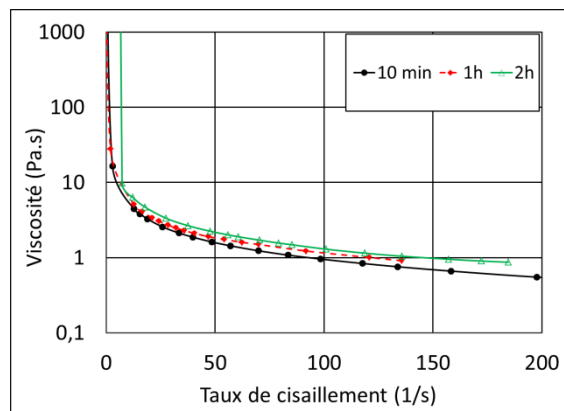
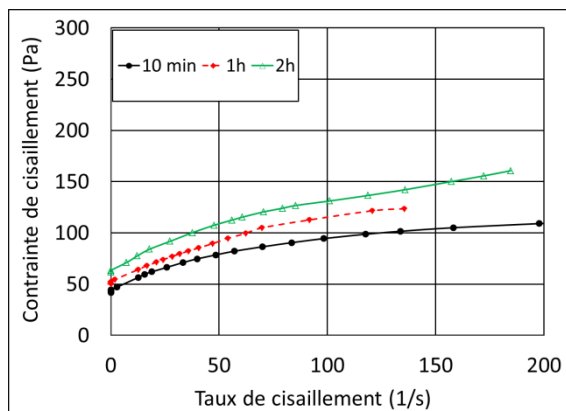
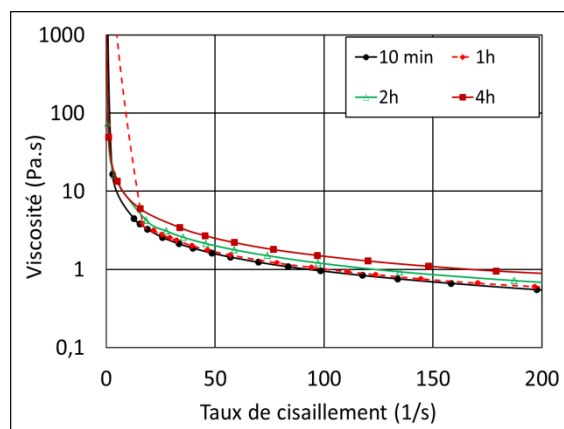
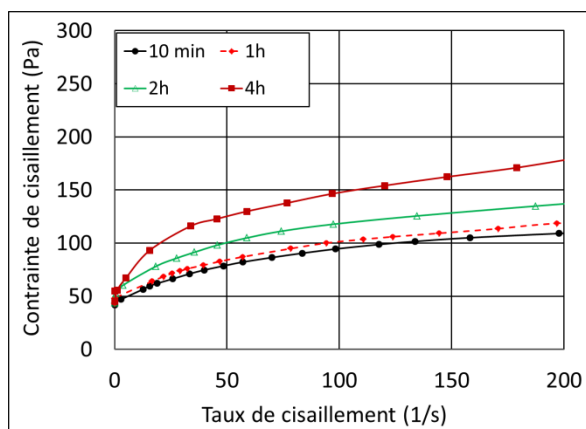
CP-
SG

Figure 4.29 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais laRonde à 70% solide et 2 % liant (CP et CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, et 2h

Tableau 4.19 : Paramètres rhéologiques du remblai LaRonde à 70%S @ 2% CP et CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@2% Liant	paramètres	10min		1h		2h	
		CP	CP-SG	CP	CP-SG	CP	CP-SG
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	41,81	40,08	49,93	44,83	60,56	46,015
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	4,98	5,75	3,172	5,54	4,75	12,28
	n_{HB}	0,505	0,48	0,652	0,49	0,58	0,388
	Erreur standard	20,06	29,56	16,97	15,55	14,5	14,86
Casson	Seuil (Pa)	44,24	45,75	47,76	48,50	60,14	53,61
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,086	0,080	0,138	0,086	0,132	0,11
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	27,38	37,6	21,67	23,34	18,13	48,8
Bingham	Seuil (Pa)	53,61	58,9	58,08	60,46	75,25	65,9
	η_B	0,354	0,292	0,56	0,346	0,51	0,406
	$n_B = 1$	1	1	1	1	1	1
	Erreur Standard	70,9	70,63	46,15	64,23	47,54	101,9
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,116	0,051	0,404	4,64e5	0,16	0,148
	K_S (Pa.s ⁿ)	37,7	32,48	49,26	31,80	45,83	52,74
	n_S	0,166	0,219	0,088	0,249	0,198	0,138
	Erreur Standard	7,74	10,33	8,77	2,95	5,28	7,60
Cross	η_0 (Pa.s)	1,39 e5	56630	1,83 e5	157,2	6457	6,458 e5
	η_∞ (Pa.s)	0,11	0,0515	0,404	1,07 e5	0,168	0,148
	k (s)	19040	14180	8246	7,76	474,0	55900
	m_{Cr}	0,833	07807	0,911	0,758	0,802	0,861
	Erreur Standard	7,74	10,34	8,77	2,84	5,30	7,60

CP

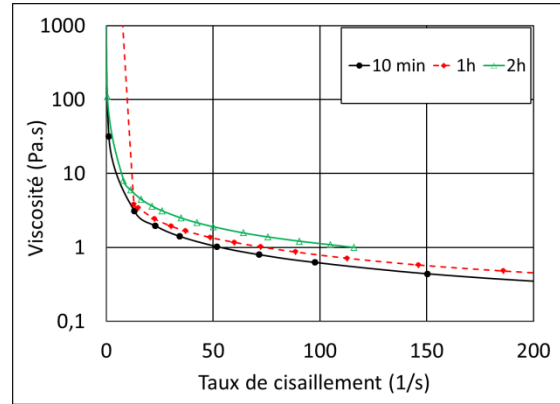
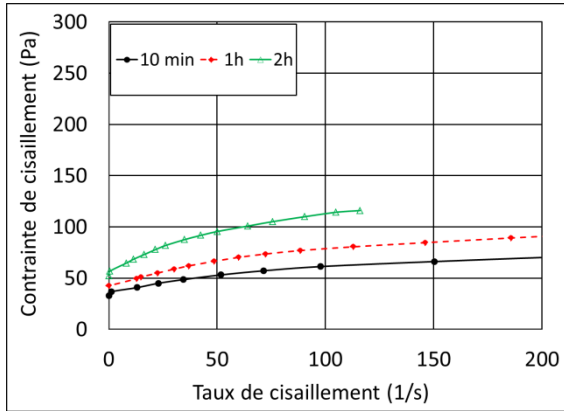
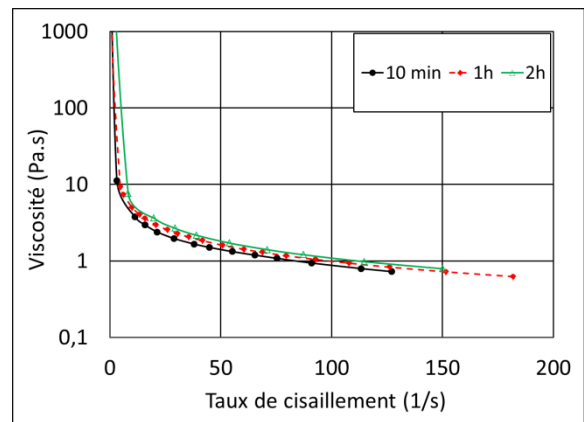
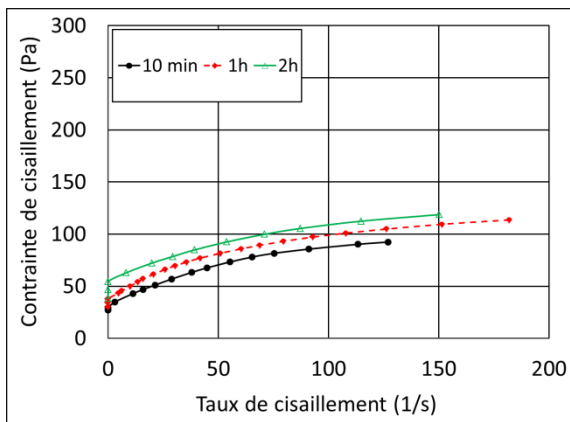
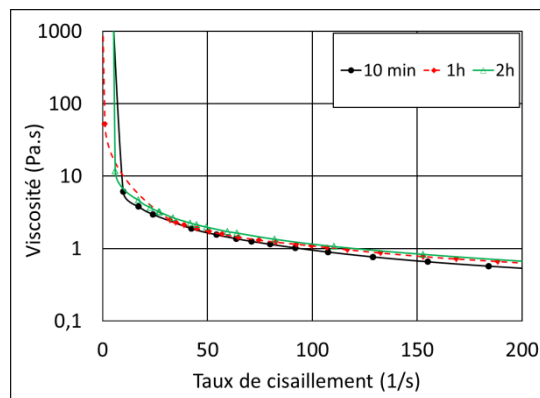
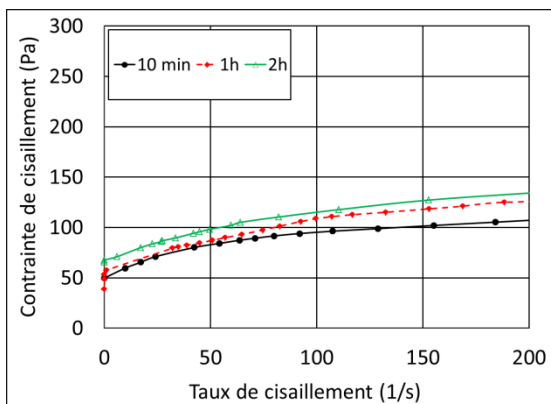
CP-
SG

Figure 4.30 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais laRonde à 70% solide et 4,5 % liant (CP et CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h et 2h

Tableau 4.20 : Paramètres rhéologiques du remblai LaRonde à 70%S @ 4,5% liant (CP10 et CP10-SG) selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@4,5% Liant	paramètres	10min		1h		2h	
		CP	CP-SG	CP	CP-SG	CP	CP-SG
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	33,14	27,1	40,55	32,11	51,76	46,21
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	2,35	4,79	2,93	7,05	4,95	6,23
	n_{HB}	0,53	0,55	0,54	0,482	0,54	0,49
	Erreur standard	16,08	24,28	23,2	25,5	13,06	32,52
Casson	Seuil (Pa)	33,49	28,88	41,23	37,33	52,51	48,36
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,04	0,16	0,054	0,138	0,11	0,11
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	17,87	30,5	25,72	38,84	15,41	37,56
Bingham	Seuil (Pa)	38,53	37,71	50,46	48,26	63,30	56,66
	η_B	0,215	0,514	0,245	0,49	0,52	0,49
	$n_B = 1$	1	1	1	1	1	1
	Erreur Standard	54,82	72,43	53,0	83,60	49,27	81,42
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,197	0,225	0,241	0,418	0,480	0,129
	K_S (Pa.s ⁿ)	38,4	26,10	48,96	45,54	61,73	41,9
	n_S	0,014	0,2	0,012	0,041	0,02	0,17
	Erreur Standard	2,81	13,7	3,41	8,52	3,4	7,51
Cross	η_0 (Pa.s)	1,24 e11	45360	3,82 e10	2,2 e8	1,15 e10	13300
	η_∞ (Pa.s)	0,197	0,226	0,241	0,41	0,480	0,12
	k (s)	4,40 e9	11080	1,02 e9	9,4 e6	2,82 e8	1091
	m_{Cr}	0,98	0,80	0,987	0,95	0,97	0,82
	Erreur Standard	2,815	13,72	3,41	8,52	3,4	7,51

CP



CP-SG

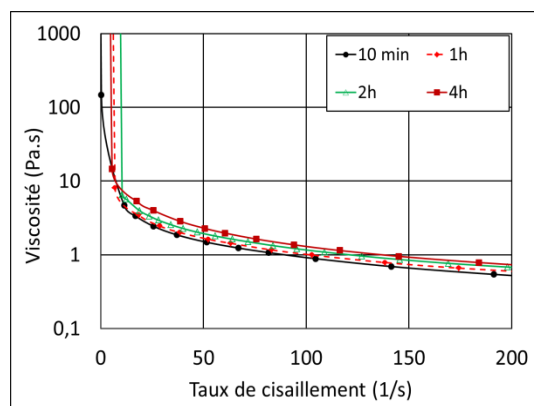
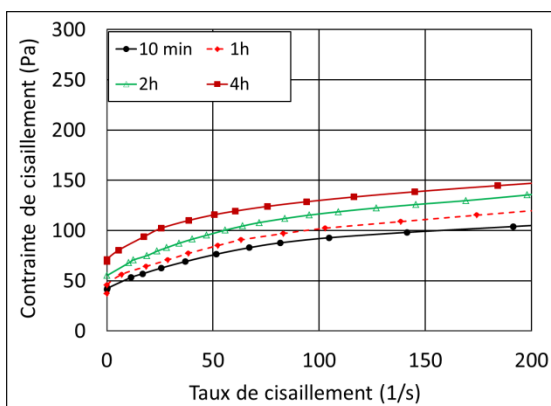


Figure 4.31 : Courbes d'écoulement et de viscosité de remblais laRonde à 70% solide et 6% liant (CP et CP-SG) aux âges de 10 minutes, 1h, 2h, et 4h.

Tableau 4.21 : Paramètres rhéologiques du remblai LaRonde à 70%S @ 6% CP et CP-SG selon les ajustements aux modèles de Herschell Bulkley, Casson, Bingham, Sisko et Cross.

70%S@6% Liant	paramètres	10min		1h		2h	
		CP	CP-SG	CP	CP-SG	CP	CP-SG
Herschell Bulkley	Seuil (Pa)	47,76	39,58	47,52	40,79	65,45	51,6
	K_{HB} (Pa.s ⁿ)	5,81	4,93	5,80	6,28	2,68	6,18
	n_{HB}	0,44	0,50	0,5	0,48	0,63	0,50
	Erreur standard	22,54	25,41	25,01	23,28	12,43	20,8
Casson	Seuil (Pa)	52,57	42,38	50,1	44,4	63,42	56,4
	K_C (Pa.s ^{1/2})	0,058	0,08	0,1	0,11	0,07	0,1
	$n_C=0,5$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Erreur Standard	30,71	32,7	29,3	33	16,65	26,35
Bingham	Seuil (Pa)	63,5	50,1	60,64	54,6	73,7	71,92
	η_B	0,278	0,33	0,41	0,41	0,40	0,38
	$n_B=1$	1	1	1	1	1	1
	Erreur Standard	64,18	75,34	69,35	80,37	37,2	56,28
Sisko	η_∞ (Pa.s)	0,248	0,235	0,248	0,12	0,19	8,6 e-3
	K_S (Pa.s ⁿ)	61,23	45,32	56,28	37,8	55,77	37,75
	n_S	0,021	0,07	0,07	0,18	0,11	0,18
	Erreur Standard	3,88	9,67	5,85	10,73	4,62	10,73
Cross	η_0 (Pa.s)	108,9	2,3 e6	2,30 e5	24420	46070	8565
	η_∞ (Pa.s)	1,5 e6	0,235	0,25	0,123	0,19	8,79 e-3
	k (s)	3,29	1,24 e5	8072	2709	2007	1261
	m_{Cr}	0,81	0,92	0,92	0,82	0,88	0,75
	Erreur Standard	4,02	9,67	5,86	10,74	4,63	6,54

4.4 Résultats des tests de fluidité

Les tests de fluidité réalisés dans cette étude ont concerné l'évaluation de l'écoulement des résidus à l'aide du mini-cône d'écoulement, de l'entonnoir en V (ou V-funnel) et du petit cône d'Abrams.

4.4.1 Résultats du mini-cône d'écoulement

La Figure 4.32 présente les résultats de l'affaissement au mini-cône d'écoulement en fonction du temps pour différentes recettes de résidus épaissis et de remblais Doyon à 70% de solides. Sur cette figure, les résidus simplement épaissis sans liant présentent les valeurs d'affaissement les plus élevées comparativement aux remblais. De plus, cet affaissement varie très faiblement dans le temps. Cela met en évidence l'effet des liants qui semble augmenter la consistance des remblais. Les plus faibles affaissements sont observés avec le remblai à base de ciment portland CP10 seul et les remblais avec des ajouts minéraux étant relativement moins denses.

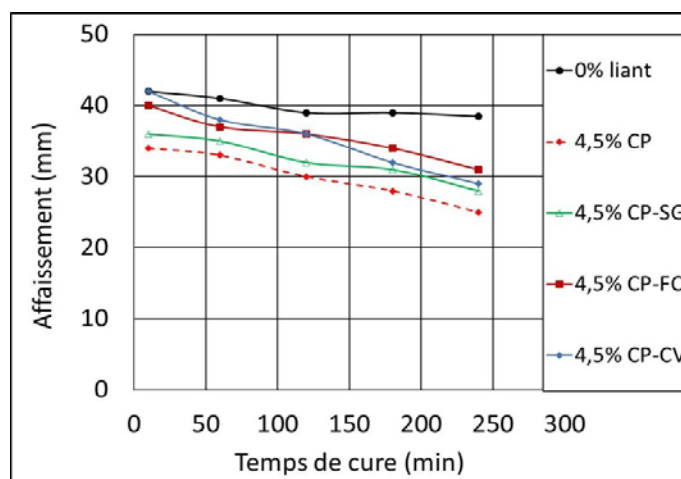


Figure 4.32 : Affaissement au mini-cône de résidus épaissi à 70% S et de remblais miniers à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).

4.4.2 Résultats du petit cône d'Abrams

L'affaissement au petit cône d'Abrams pour différentes recettes de remblai à 70 % de solides et 4,5 % de liant est présenté sur la Figure 4.33. Tout comme les résultats du min-cône, le plus fort affaissement a été enregistré avec les résidus simplement épaissis tandis que le plus faible affaissement correspond à celui du remblai à base de CP10 seul pendant que les affaissements des remblais avec des ajouts minéraux se situent entre ces deux extrêmes. En effet, l'affaissement des résidus épaissis est relativement très faible et presque constant selon les âges. Il est de 12,8 cm à 10 minutes d'âge et de 12,5 cm après 4 h d'âge.

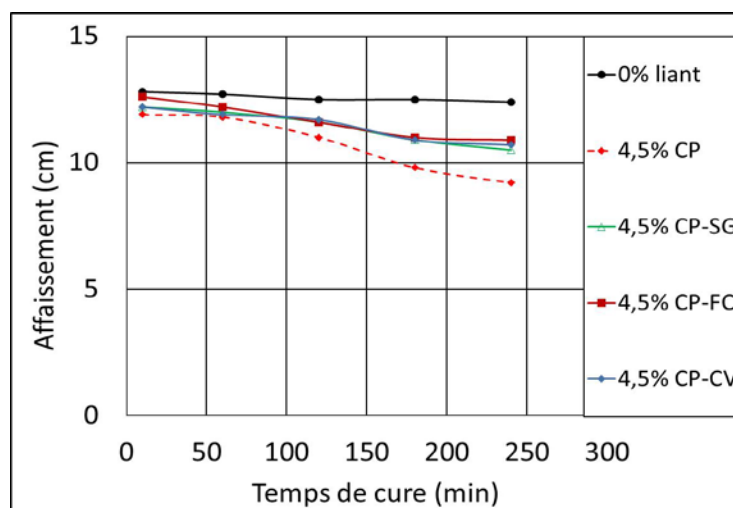


Figure 4.33 : Résultats de l'affaissement au petit cône d'Abrams de résidus épaissi à 70% S et de remblais miniers à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).

Le remblai avec CP10 seul présente le plus faible affaissement à tous les âges comparativement aux autres remblais à base de liant comportant des ajouts minéraux. Cet affaissement est de 11,9 cm juste après le mélange de remblai à 10 minutes et évolue en diminuant pour atteindre jusqu'à 9,2 cm après 4 h d'âge. Le remblai avec le liant de 20CP10/80FC a un affaissement plus élevé au temps de 10 minutes par rapport aux autres recettes comportant des ajouts minéraux. Puis, les affaissements de ces recettes sont presque confondus entre 1 h et 3 h d'âge. À l'âge de quatre

heures, l'affaissement de 20CP10/80FC se retrouve être légèrement plus élevé que les autres recettes avec ajouts minéraux (20CP10/80Slag et 20CP10/80CV). On peut en conclure que tous les liants utilisés entraînent une réduction de la fluidité des résidus. Cependant, les ajouts minéraux en général améliorent la fluidité des remblais de manière significative comparativement au liant à base de CP10 seul.

4.4.3 Résultats avec le V-funnel

La Figure 4.34 montre l'évolution du temps d'écoulement des remblais à travers le « V-funnel ». Il ressort que le remblai à base de ciment portland seul présente des temps d'écoulement plus élevés pour un âge donné des remblais. Pour l'ensemble des recettes ce temps d'écoulement est compris entre 2 s et 6 s pour des âges compris entre 0 et 3 heures. Au-delà de 3 h d'âge, le temps d'écoulement devient très élevé en raison de l'apparition d'un écoulement discontinu particulièrement marqué pour le remblai avec CP10 seul. On peut en conclure que l'outil de V-funnel est adapté pour caractériser l'écoulement des remblais jusqu'à 3h d'âge.

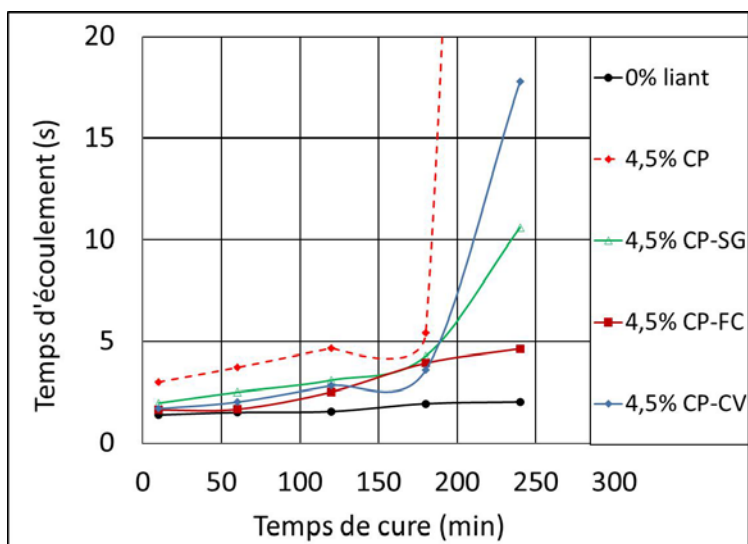


Figure 4.34 : Temps d'écoulement au «V-Funnel» de résidus épaissi à 70 % de solides et de remblais miniers à 70 % de solides et 4,5 % de liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).

4.4.4 Résultats de la caractérisation du ressuage des remblais

Les résultats montrent un ressuage plus important pour les résidus simplement épaissis à 70 %, 72,5 % et 75 % de solides. Leurs taux de ressuage sont présentés dans la Figure 4.35. Comme on pouvait s'y attendre, le ressuage est plus important pour les résidus à pourcentage de solides moins élevé (70% et 72,5% de solides) tandis que pour le résidu à 75% de solides le ressuage est presque inexistant en raison de sa structure plus pâteuse et plus denses.

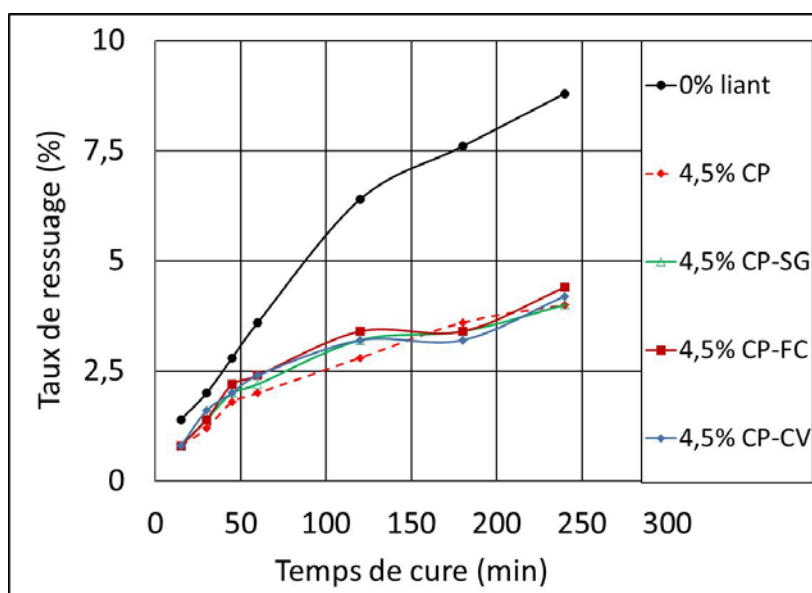


Figure 4.35 : Taux de ressuage de résidus épaissis à 70 % de solides et de remblais miniers à 70 % de solides et 4,5 % de liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC et CP10-CV).

4.4.5 Résultats de la mesure de la résistance mécanique

Le remblai utilisé sous terre dans le but de constituer un support de terrain doit présenter une résistance mécanique minimale pour pouvoir bien jouer ce rôle. Il nous a semblé alors important d'évaluer ce paramètre pour les recettes de remblais étudiées. Afin de vérifier les caractéristiques

mécaniques des recettes des remblais confectionnés avec les résidus des deux mines, des tests de compression mécanique ont été réalisés sur les éprouvettes de remblais de la mine Doyon ayant 70 % et 72,5% de solides et 4,5% de liant CP 10 et 20CP10/80Slag. Les recettes des remblais LaRonde testées étaient constituées de 70% de Solide et 4,5% de liant CP10 et 20CP10/80Slag. Ainsi la résistance des remblais a été mesuré au temps de cure de 7, 14 et 28 jours. Les résultats d'UCS obtenus sur les remblais Doyon et LaRonde sont présentés à la Figure 4.36. À travers cette figure, il ressort que l'UCS des remblais à base de 20CP10/80Slag est le plus élevé pour un même type de résidus au même pourcentage. Cependant pour un même pourcentage de liant et de solides, les remblais Doyon présentent des résistances mécaniques sensiblement meilleures que les remblais LaRonde. Cela peut s'explique par la différence de densité spécifique des résidus qui entraînent un pourcentage volumique ($C_v = 45\%$) plus élevé pour les résidus de la mine Doyon ayant la faible densité spécifique (autour de 2,80) par rapport au pourcentage de résidus LaRonde soit ($C_v = 41\%$) pour une densité spécifique de 3,41.

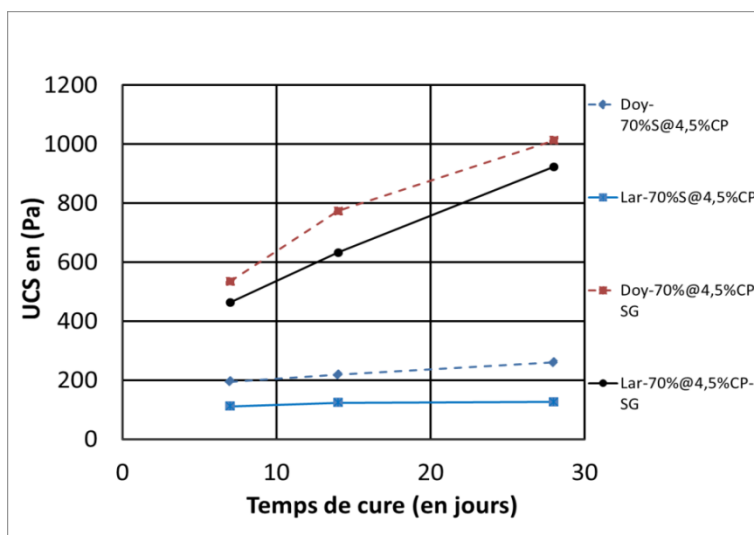


Figure 4.36 : Résultat de la résistance en compression uniaxiale (UCS) des remblais Doyon et LaRonde ayant des pourcentages de solides de 70% de solides et 4,5% de liant (CP10-CP10-SG).

En comparant les résultats de la résistance des remblais Doyon au pourcentage de liant de 4,5% (CP10 et CP10-SG) mais à des pourcentages de 70 % et 72,5 % de solides, présentés à la Figure

4.37, on relève que pour un même type (CP10 seul ou CP1-SG) et au même pourcentage de liant 4,5%, l'UCS est plus élevé pour le remblai au plus fort pourcentage de solides soit 72,5 %. Ces résultats corroborent une fois de plus la performance mécanique des mélanges composites CP10/Slag comparativement aux mélanges à CP seul en raison de l'effet pouzzolanique et de raffinement de la microstructure des remblais. Ces résultats ont été observés par plusieurs auteurs (Belem, 2000, Benzaazoua, 2003, 2004, Yilmaz, 2003, Ouellet, 2005, Peyronnard 2010, Belem et al., 2010).

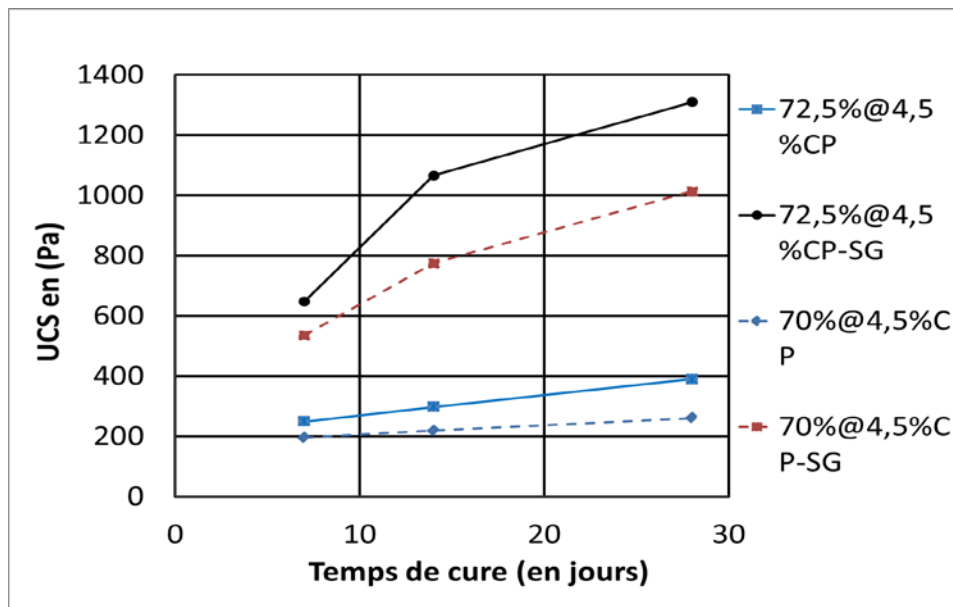


Figure 4.37: Évolution de l'UCS des recettes de remblais à 70% et 72,5% solide avec 4,5% de liants CP et CP-SG.

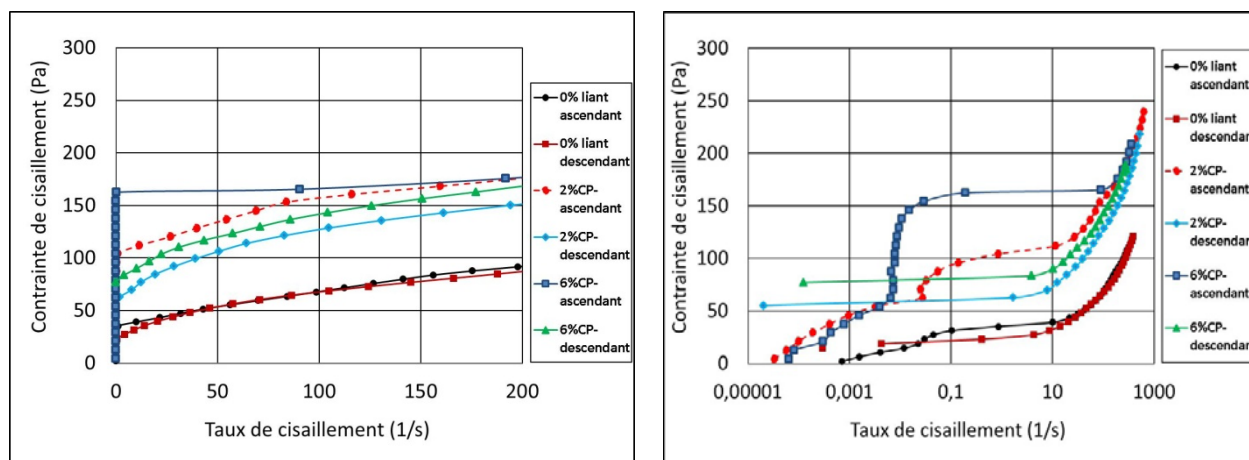
CHAPITRE 5 DISCUSSIONS DES RÉSULTATS

Ce chapitre analyse l'ensemble des résultats présentés dans le chapitre précédent (chapitre 4) à travers les explications des valeurs obtenues concernant les paramètres rhéologiques et vise à établir des liens entre les résultats de la méthode rhéométrique avec les autres méthodes de mesure de la fluidité (méthodes empiriques). Les particularités relevées dans les résultats, notamment le caractère thixotropique et l'influence des procédures d'ajustement des modèles rhéologiques, sont également discutées. Cette partie inclut aussi l'évolution des paramètres rhéologiques dans le temps, en fonction de la teneur en eau, de la proportion et du type de liant.

5.1 Analyse du comportement thixotropique des remblais

L'investigation du comportement thixotropique d'un matériel fluide se fait en «mode écoulement» à travers des essais selon une procédure de chargement ascendant puis descendant de la contrainte de cisaillement appelé « *shear loop test* ». Cette manière de procéder permet de saisir dans son intégralité le comportement général du fluide en question et même d'éventuel comportement dépendant du temps. En effet, le rhéogramme issu de cette méthode présente une courbe ascendante et une courbe descendante. Les graphiques des Figures 5.1 et 5.2 présentent dans une échelle linéaire à (gauche) et en échelle semi-logarithmique à (droite), les courbes d'écoulement ascendantes et descendantes typiques de résidus épaissis et de remblais de la mine Doyon ayant un pourcentage solide de 70% et des proportions du liant CP10 (en haut) et 20CP10/80Slag (en bas) de 2 %, 4,5% et 6%. Ainsi l'analyse de la courbe ascendante en représentation semi-logarithmique permet d'observer trois parties différentes. Une première partie linéaire correspondant au comportement d'un solide élastique pour les valeurs de taux de cisaillement très faibles de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-2}s^{-1} . Cette portion est suivie par une seconde correspondant au comportement visco-élastique qui s'étend sur une plage de taux de cisaillement très réduite située entre 10^{-2} et $0,1\text{ s}^{-1}$. La troisième partie de la courbe correspond à la phase visqueuse réelle d'écoulement continu avec des taux de cisaillement relativement élevés de l'ordre de 1 à quelques centaines par seconde. Cette courbe ascendante intègre l'histoire des

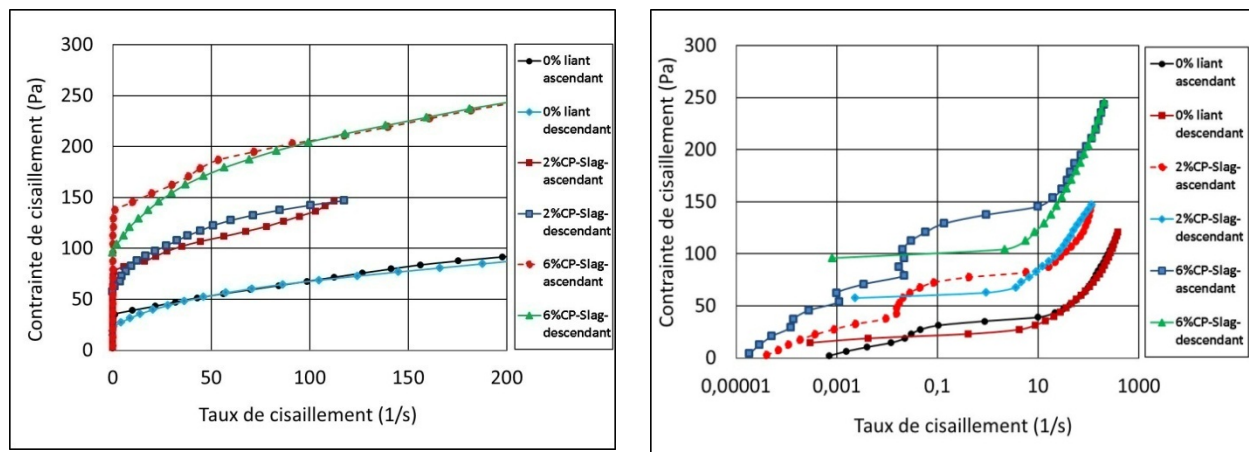
traitement en tout genre subis par le matériau, à savoir les processus de malaxage, de précisaillement et même les artéfacts de chargement de l'échantillon sur le stator (Goudoulas et al., 2003). La courbe descendante, quant à elle, présente la partie visqueuse et s'achève de manière directe sans transition sur les parties viscoélastique et élastique. Cette courbe permet une évaluation plus précise des paramètres rhéologiques par l'usage des modèles mathématiques (Ragouilliaux et al. (2006), Ouattara et al., 2010) ont obtenu des résultats similaires dans leur investigation sur les propriétés rhéologiques des boues de forage et de résidus miniers. Les courbes d'écoulement ascendantes et descendantes présentent une différence car elles ne se superposent pas. Elles laissent apparaître une hystérésis plus apparente sur les représentations en échelle semi-logarithmique des graphiques à droite sur la Figure 5.1.



a) Courbes d'écoulement de remblais Doyon à 70%S@4,5%CP en représentation linéaire

b) courbes d'écoulement de remblais Doyon à 70%S@4,5%CP en représentation semi-log

Figure 5.1 : Mise en évidence du comportement thixotropique des remblais Doyon à un pourcentage solide de 70% et des proportions de liant CP de 2 %, 4,5% et 6% (représentation en échelle linéaire à gauche et en échelle semi-logarithmique à droite)



a) Courbes d'écoulement de remblais Doyon à 70%S et 4,5%CP-SG en représentation linéaire

b) Courbes d'écoulement de remblais Doyon à 70%S et 4,5% CP-SG en représentation Semi-log

Figure 5.2 : Mise en évidence du comportement thixotropique des remblais Doyon à un pourcentage solide de 70% et des proportions de liant CP-SG de 2 %, 4,5% et 6% (représentation en échelle linéaire à gauche et en échelle semi-logarithmique à droite)

L'observation de cette hystérésis caractérise le comportement thixotropique des résidus épaissis. La quantification de cette thixotropie est basée sur les valeurs des seuils de contraintes de cisaillement de la courbe ascendante et de la courbe descendante. En effet la courbe ascendante donne la valeur du seuil de cisaillement statique, tandis que la courbe descendante donne celle du seuil dynamique conformément à la définition de Barnes et Nguyen (2001). Ces auteurs considèrent comme seuil static *“the departure from linearity of stress response in a plastic solid as the strain is increased”* et le seuil dynamique étant pris comme *“the cessation of flow in a structured liquid as the stress is decreased”*.

L'existence du comportement thixotropique est expliquée par le fait que les matériaux cimentaires ont tendance à développer une structuration relative, lorsqu'ils sont au repos due à une floculation des constituants cimentaires et se déstructurent lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de cisaillement. En fait, pendant l'augmentation de la contrainte de cisaillement en

phase ascendante, les forces électrostatiques développées pendant la structuration sont détruites progressivement tandis qu'elles se reconstituent au fur et à mesure que la contrainte est réduite au cours de la phase descendante. Coussot et Roussel (2006) relèvent qu'il faut bien différencier le comportement thixotropique qui est un phénomène réversible (par malaxage) du phénomène de vieillissement qui entraîne également une diminution de la viscosité mais qui résulte de l'effet d'hydratation des phases cimentaires, donc irréversible.

5.2 Analyse de l'évolution des paramètres rhéologiques avec le temps (effet de l'âge du remblai).

En raison de l'ajout de liants dans les mélanges de remblais, il est attendu qu'une évolution des paramètres rhéologiques avec le temps due à l'hydratation de ces liants sera observée. Ceci peut être d'une grande utilité surtout lorsque, pour une raison ou une autre les remblais n'ont pas pu être acheminés rapidement après leur préparation à l'usine de remblai. Pour saisir l'effet de l'âge des remblais sur les paramètres rhéologiques, la progression des valeurs de ces paramètres sont présentés en fonction du temps présentés sur les Figure 5.3, 5.4 et 5.5. Sur la Figure 5.3, il est présenté l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique de Bingham en fonction du temps obtenus pour les recettes des résidus épaisés 70 % de solides et celles de remblais à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10, 20CP10/80Slag, 20CP10/80FC et 20CP10/80CV) sur le viscosimètre ConTec. La figure 5.4 montrent l'évolution du seuil de cisaillement en fonction du temps obtenues avec les recettes de résidus et remblais à 70%S et 0%, 2%, 4,5% et 6% liant (CP et 20CP10/80SG) (selon les différentes équations de d'ajustement données par le rhéomètre AR 2000. La Figure 5.5 indique l'évolution des paramètres rhéologiques selon les mêmes modèles d'ajustements pour les recettes de résidus épaisés et de remblais ayant aussi un pourcentage de 72,5 de solide et de 4,5% liant (CP10, CP10, 20CP10/80Slag) obtenues par le rhéomètre AR 2000. Sur toutes ces figures, les seuils de cisaillement des résidus simplement épaisés à 70% solide ou 72,5% de solides sont quasiment constants avec le temps tandis que les valeurs de ces paramètres pour les remblais connaissent une croissance appréciable avec le temps pour tous les types de liants utilisés. Cette croissance du seuil de cisaillement est plus accentuée pour les

remblais à base de CP10 seul, bien que quasiment identique à l'âge de 10 minutes pour toutes les recettes (Figures 5.3, 5.4 et 5.5). Toutefois cette augmentation du seuil de cisaillement semble plutôt moindre et constante pour les remblais confectionnés avec des liants constitués de 20% CP 10 et des ajouts minéraux à hauteur de 80%. La croissance du seuil de cisaillement est globalement comparable pour les remblais avec ajout (voir Figure 5.3). Sur les Figures 5.4 et 5.5, l'évolution du seuil de cisaillement pour les remblais faits uniquement avec le liant CP10 est plus ou moins linéaire comparativement à celle des remblais à base de 20CP10/80Slag qui connaît une faible croissance entre 10 minutes et 1 heure d'âge et cela pratiquement à tous les pourcentages de liants. Cela indique une réaction tardive d'hydratation des remblais à CP-SG par rapport aux remblais à CP seul. De même pour ce qui concerne l'évolution du paramètre viscosité, une constance est relevée pour le résidu simplement épaissi tandis que ce paramètre connaît une augmentation pour tous les remblais. Tout comme le seuil de cisaillement, le remblai à base de CP seul présente une croissance plus accentuée. La viscosité des remblais contenant des ajouts sont plus ou moins dans le même ordre de grandeur.

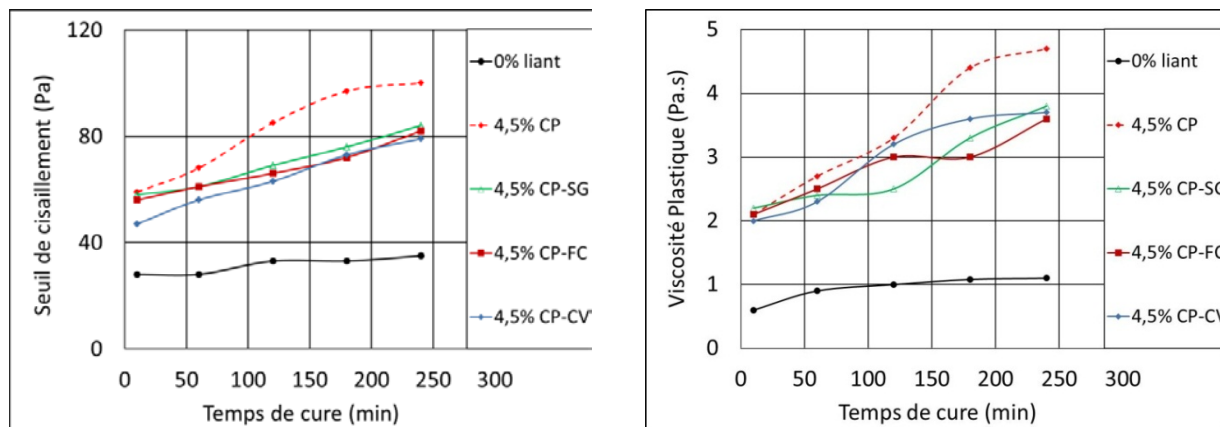
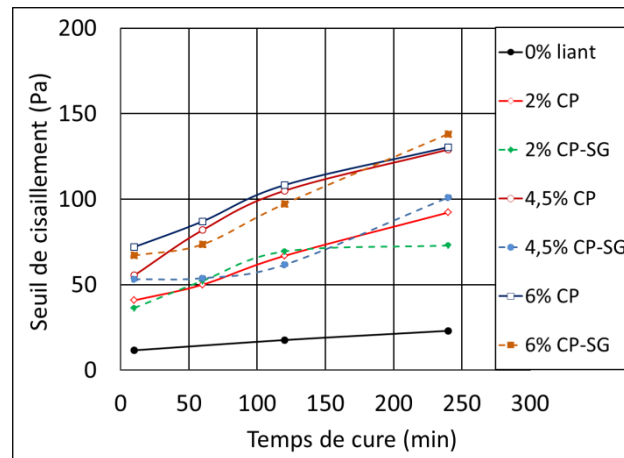
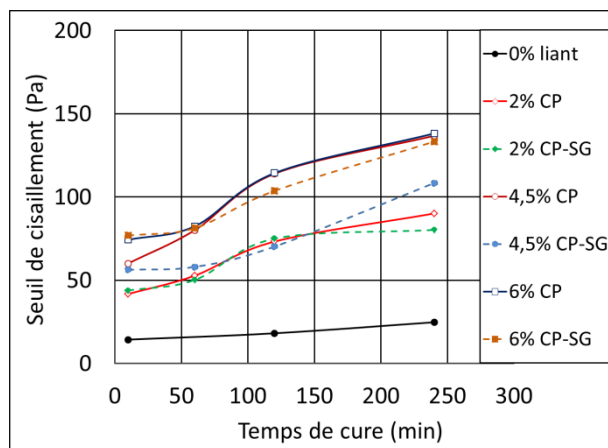


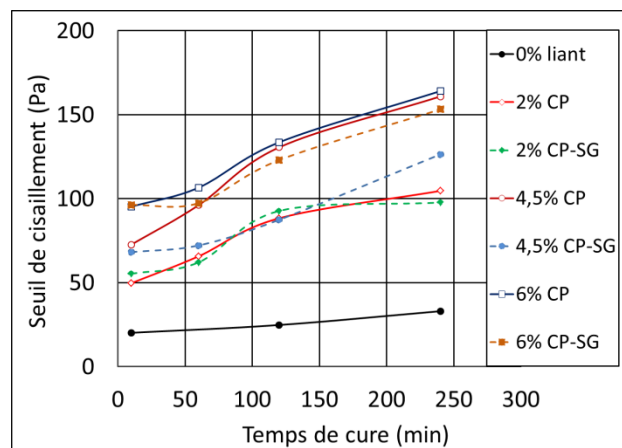
Figure 5.3 : Évolution de seuil de cisaillement (à gauche) et de la viscosité plastique de Bingham (à droite) en fonction du temps pour les résidus de la mine Doyon épaissis à 70 % de solides et des remblais à 70 % de solides et 4,5 % de liant (CP, CP-SG, CP-FC et CP-CV) obtenus sur le viscosimètre ConTec.



a) Selon l'ajustement au modèle de Herschel Bulkley

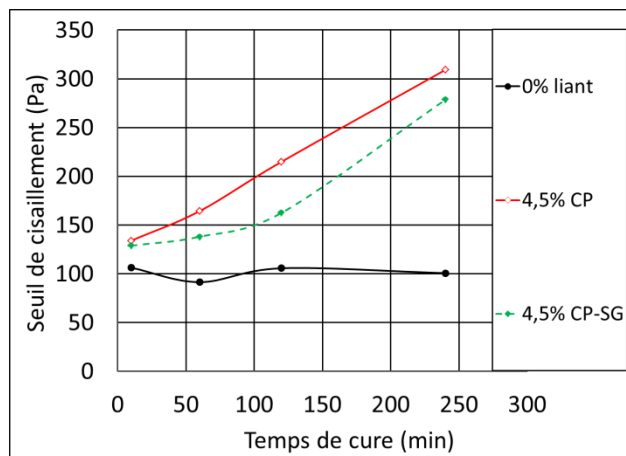


b) Selon l'ajustement au modèle de Casson

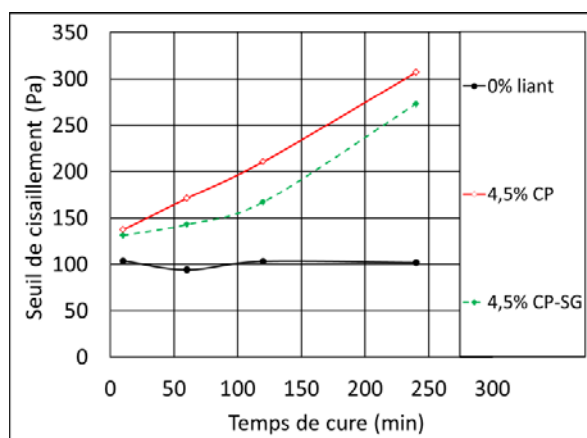


c) Selon l'ajustement au modèle de Bingham

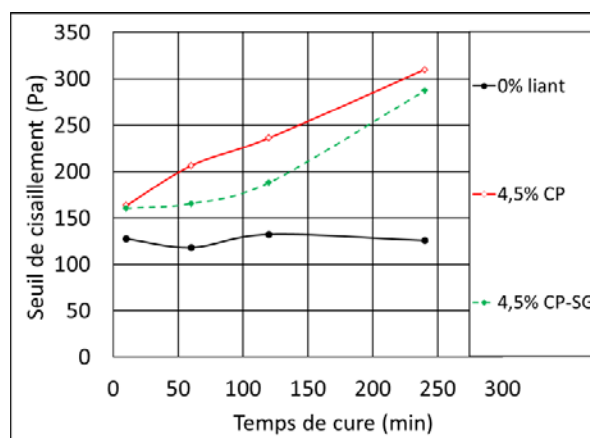
Figure 5.4 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du temps de résidu Doyon épaissi à 70%S et de remblais à 70%S et 4,5% liant (CP10, CP10-SG,) obtenus sur le rhéomètre AR2000.



a) Selon l'ajustement au modèle de Herschell Bulkley



b) Selon l'ajustement au avec le modèle de Casson



c) Selon l'ajustement au le modèle de Bingham

Figure 5.5 : Évolution de seuil de cisaillement en fonction du temps de résidu Doyon épaissi à 72,5% S et de remblais à 72,5% S et 4,5% liant (CP, CP-SG,) obtenus sur le rhéomètre AR2000.

Il ressort globalement à travers ces figures ci-dessus que la perte de fluidité dans le temps est plus marquée pour les remblais à base de liant constitué uniquement de CP 10 due à une demande en eau pour l'hydratation plus importante que pour les liants comportant des ajouts minéraux. Cela a été également confirmé par les taux de ressuage qui sont plus faibles dans les remblais à base de CP seul comparativement aux remblais ayant des ajouts minéraux.

5.3 Corrélation des résultats rhéologiques et de fluidité

L'utilisation des outils simples d'estimation des paramètres rhéologiques est courante dans les industries de la construction et les usines de remblayage minier. Il est alors essentiel de pouvoir établir des ordres de grandeur entre les données rhéologiques issus de rhéomètres conventionnels et les résultats fournis par ces outils simples. Ces corrélations ont porté sur les recettes fabriquées à partir des seuls résidus Doyon qui ont été plus intensément étudiées. Les corrélations ont alors été faites avec les données de mini-cône d'écoulement, du petit cône d'Abrams, et du *V-funnel*. Si les résultats du mini-cône et du petit cône d'Abrams ont porté sur les recettes aux pourcentages solides de 70, 72,5%, les résultats du V-funnel se sont limités au seul pourcentage de 70% car au-delà, aucun écoulement n'était possible. Dans cette section les paramètres rhéométriques sont ceux obtenus avec le viscosimètre ConTec dont l'ajustement utilise le modèle de Bingham.

5.3.1 Corrélation entre seuil de cisaillement et affaissement au mini-cône

Les résultats de mesure d'affaissement au mini-cône constitués par la hauteur d'affaissement des résidus sur la plaque horizontale ont été utilisés pour établir une corrélation avec le seuil de cisaillement obtenu par le viscosimètre ConTec. Les résultats de ces corrélations ont permis d'obtenir les graphiques de la Figure 5.6. La corrélation intégrant l'ensemble des résultats du mini-cône de toutes les recettes testées a donné une équation linéaire de type $y = -a \cdot x + b$ et un coefficient de détermination R^2 de 0,859 (coefficient de corrélation $r = 0,93$).

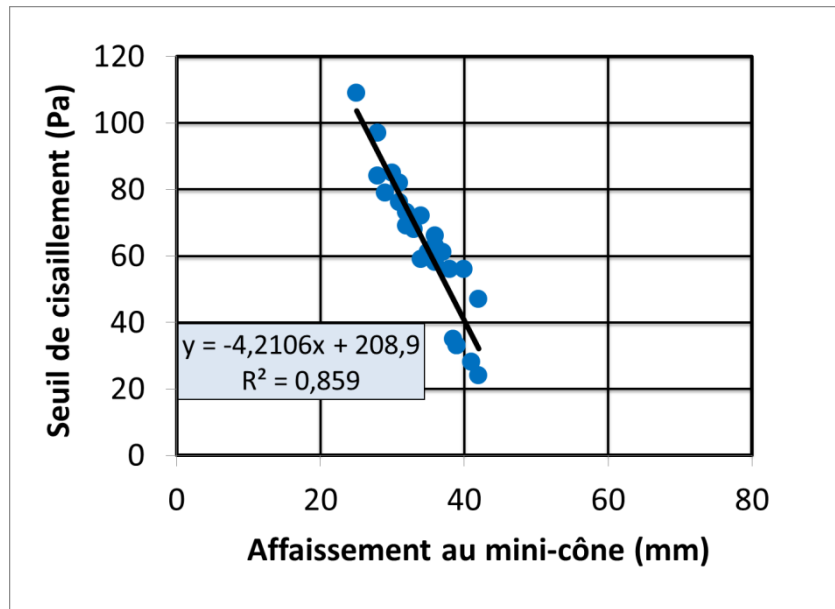
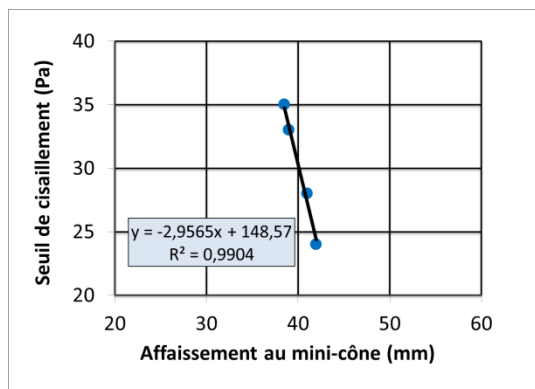
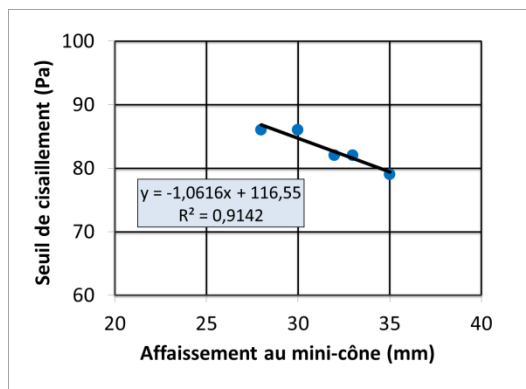


Figure 5.6 : Corrélation entre seuil de cisaillement et résultats d'ensemble de l'affaissement au mini-cône d'écoulement pour le résidu Doyon épaissi à 70%S et de Remblais Doyon à 70%Set 4,5 % de liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC, et CP10-CV)

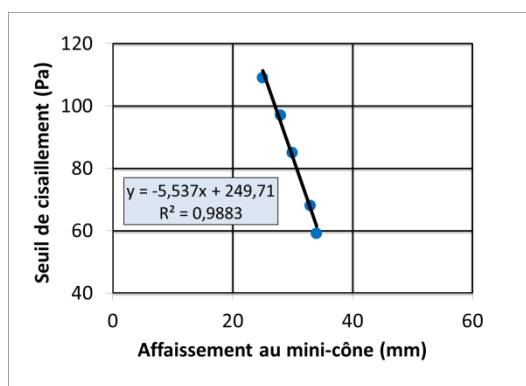
Une corrélation par recette a été effectuée, ce qui a donné des coefficients de détermination pour chaque recette. Les graphiques de ces corrélations sont représentés à la Figure 5.7. Cela a permis d'augmenter le coefficient de détermination pour chaque recette. Ainsi, le Tableau 5.1 donne les équations des droites de corrélation entre les données rhéométriques et les résultats des tests au mini-cône d'écoulement de même que les coefficients de détermination pour chaque recette.



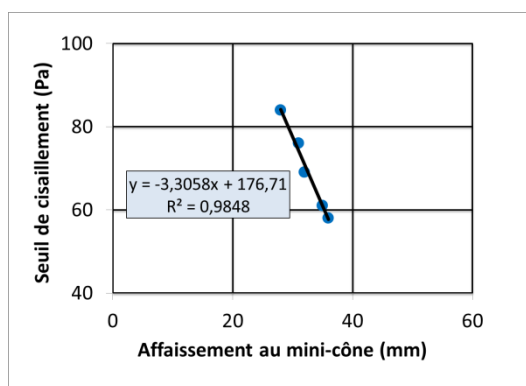
a) Résidu Doyon épaissi à 70%



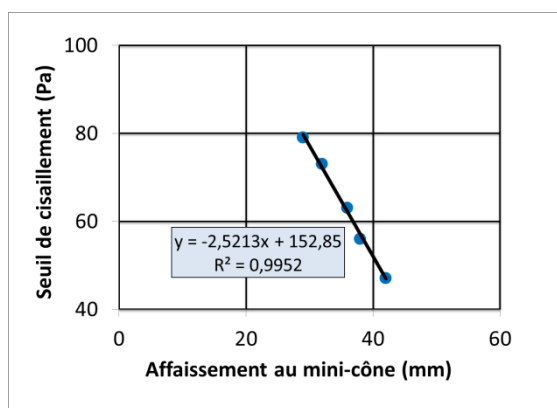
b) Résidu Doyon épaissi à 72,5%



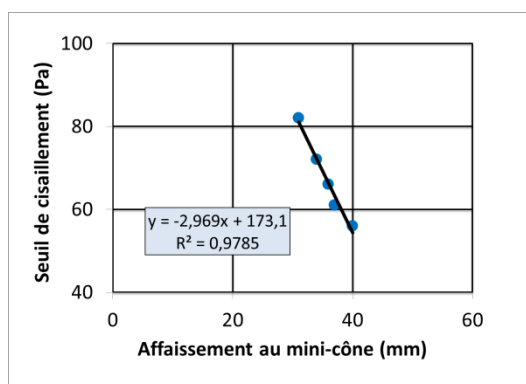
c) Remblai à 70% S@ 4,5% CP



d) Remblai à 70% S@ 4,5% CP-SG



e) Remblai à 70% S@ 4,5% CP-CV



f) Remblai à 70% S@ 4,5% CP-FC

Figure 5.7 : Corrélation entre seuil de cisaillement et résultats de l'affaissement au mini-cône d'écoulement pour le résidu Doyon épaissi à 70% S et de Remblais Doyon à 70% S@ 4,5% liant (CP10, CP10-SG, CP10-FC, et CP10-CV).

Tableau 5.1 : Équations et coefficients de corrélation des recettes de résidus Doyon densifiés

Recettes	Équations linéaires	Coefficients R ²
Toutes les recettes confondues	$y = -4,210x + 208,9$	0,85
Épaissis à 70%	$y = -2,865x + 148,57$	0,99
Épaissis à 72,5% Solide	$y = -1,6160x + 116,55$	0,91
Remblais à 70%S@4,5%CP	$y = -5,537x + 249,71$	0,98
Remblais 70%S@4,5%CP-SG	$y = -3,3058x + 176,71$	0,98
Remblais70%S@4,5%CP-CV	$y = -2,969x + 173,1$	0,97
Remblais à 70%S@4,5%CP-FC	$y = -2,5213x + 152,85$	0,99

$y =$ seuil de cisaillement à prédire en Pa; $x =$ affaissement au mini-cône, en mm.

En analysant chaque équation, les observations suivantes peuvent être émises :

- Les pentes des droites de corrélation sont comprises entre -1,6 pour la recette des résidus épaissis à 72,5 % de solides et -5,5 pour le remblai à 4,5 % de CP10 seul, tandis que cette pente pour l'ensemble des recettes est de -4,2 (moyenne).
- Les valeurs de l'intercepte sont comprises entre 116 pour les résidus à 72,5 % de solides et 250 pour la recette de remblai à 70 % de solides et 4,5 % de CP10, celle de la droite pour l'ensemble des recettes étant égale à 208.
- Pour les recettes individuelles, on remarque que le coefficient de détermination la plus faible de 0,91 est observé avec les résidus à 72,5 % de solides tandis que des coefficients de détermination supérieur ou égal à 0,97 sont enregistrés pour toutes les autres recettes.

Les résidus simplement épaissis à 72,5 % de solides semblent être à l'origine de la diminution du coefficient de détermination, car les données sont plus dispersées par rapport aux données des remblais. Ces résultats laissent penser que le mini-cône d'écoulement serait plus adapté pour l'évaluation du seuil de cisaillement des résidus de moindre concentration en solides (autour de 70 %) qui autorise un écoulement continu contrairement aux résidus plus concentrés dont l'écoulement est relativement faible.

5.3.2 Corrélation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement au petit cône d'Abrams

La corrélation des résultats de l'affaissement au petit cône d'Abrams avec les résultats du seuil de cisaillement obtenus au rhéomètre est présentée à la Figure 5.8. La corrélation a donné une équation de la forme $y = -21,512x + 312,07$ et un coefficient de corrélation R^2 de 0,868. Ce coefficient est assez proche du coefficient de corrélation obtenu dans le cas de la corrélation avec les résultats du mini-cône.

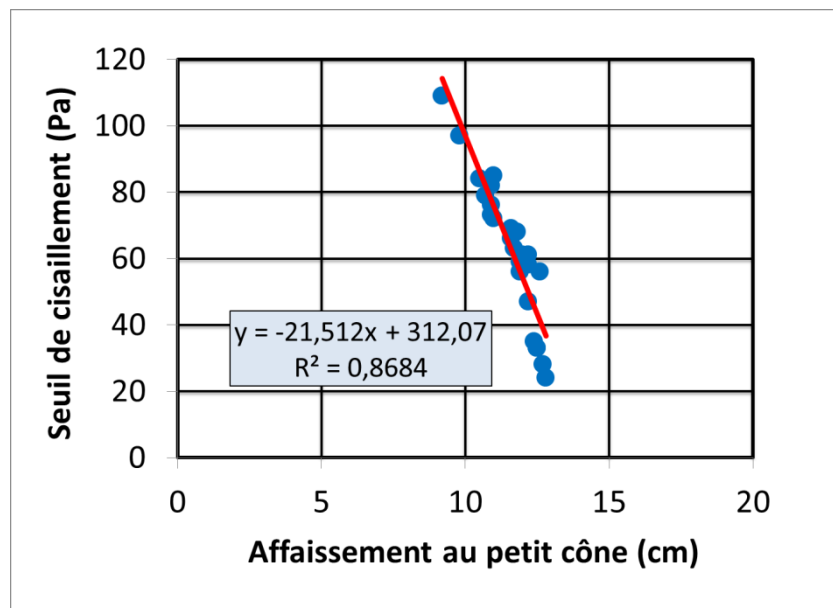


Figure 5.8 : Corrélation entre l'affaissement au petit cône et le seuil de cisaillement

5.4 Effet du pourcentage de solides sur les propriétés rhéologiques

La Figure 5.9 présente l'évolution du seuil de cisaillement en fonction du pourcentage de solides des résidus épaissis. Sur cette figure, le seuil de cisaillement croît selon une loi exponentielle en fonction de la concentration en solides. En effet, l'ajustement d'une courbe de tendance exponentielle aux données expérimentales a conduit à un coefficient de détermination de 0,9 ($r = 0,95$). L'équation de la courbe de tendance est :

$$y = 3E - 9 \cdot \exp(0,3264 \cdot x) \quad (5.1)$$

Où y = seuil de cisaillement en Pa et x = pourcentage de solides (%).

Plusieurs auteurs ont obtenu une variation exponentielle similaire à cette corrélation pour l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration solide des résidus miniers (Nguyen et Boger, 1983 et 1985 pour des pourcentages de solides variant de 57 % à 68 %; Uhlherr et al., 1984; James et al., 1987; Yoshimura et al., 1987; Keating and Hannant 1989, Pashia et al., 1996, Gaswu et Fourie, 2002, Diouf, 2005).

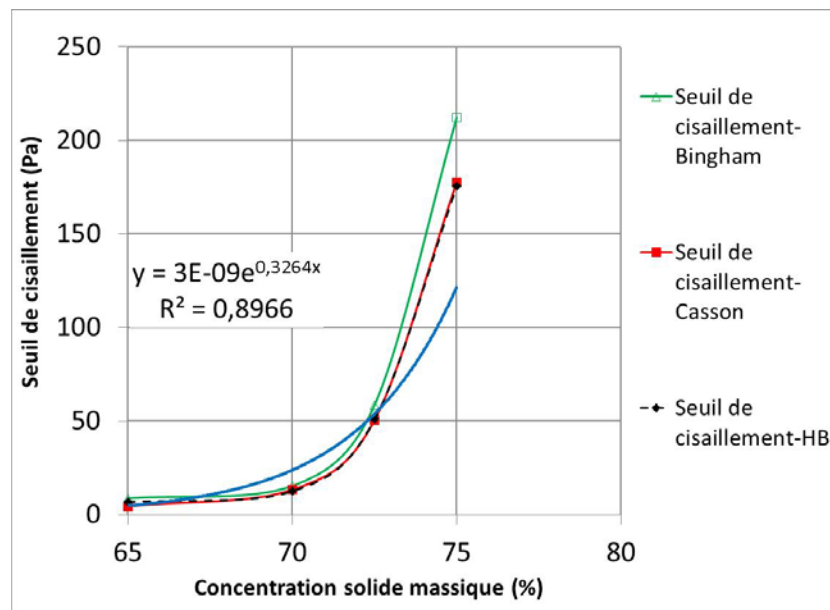


Figure 5.9 : Évolution du seuil de cisaillement en fonction du pourcentage de solides des résidus épaisés

La Figure 5.10 présente l'affaissement en fonction de la concentration solide. Cette figure corrobore l'évolution exponentielle du seuil de cisaillement avec la concentration solide. En effet,

l'affaissement connaît une légère diminution entre 70 et 72,5 % avant d'être plus accentué pour la concentration de 75 %.

La Figure 5.10 représentant l'affaissement en fonction de la concentration solide. Cette figure corrobore l'évolution exponentielle du seuil de cisaillement avec la concentration solide. En effet, l'affaissement connaît une légère diminution entre 70 et 72,5% avant d'être plus accentué pour la concentration de 75%.

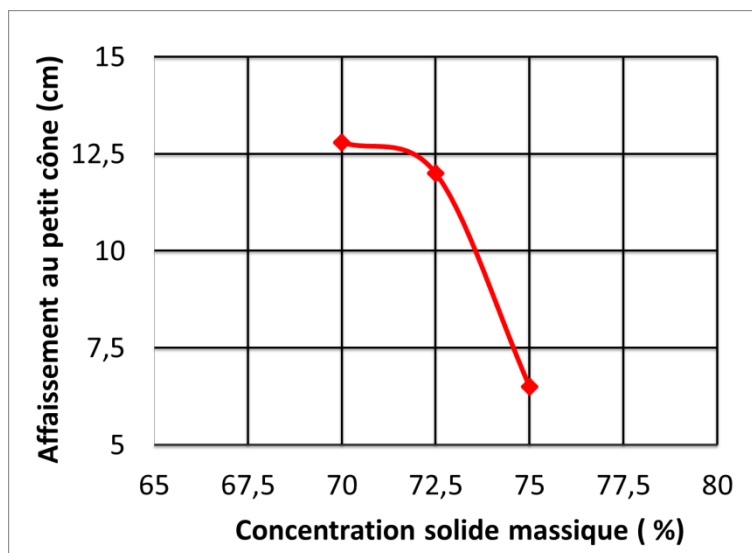


Figure 5.10: Évolution de l'affaissement au petit cône en fonction du pourcentage solide des résidus Doyon épais.

5.5 Effet du type de liant et du pourcentage de liant

Le remblai est obtenu suite à l'ajout de liant et d'eau aux résidus en pâte. Le comportement rhéologique des résidus épais et des remblais sont typiquement différents à cause de l'ajout de liant dans les remblais. Les liants ont un effet direct sur les comportements rhéologiques des remblais. Selon la nature et le pourcentage des liants additionnés, les influences sur ces paramètres ne seront pas identiques. Comme précédemment mentionné, l'ajout de liant aux

résidus en pâte vise à améliorer certaines caractéristiques des remblais notamment la rétention en eau, la conductivité hydraulique, l'auto portance et la résistance. Dans cette section, l'effet des liants sur les propriétés rhéologiques des remblais sera analysé. Dans cette optique, les courbes d'écoulement des remblais avec les liants de CP10 et 20CP10/80Slag au pourcentage de 4,5 % juste après leur confection sont comparées avec les courbes d'écoulement de résidus simplement épaissis aux pourcentages de solides de 70 % et 72,5 % sur la Figure 5.11. On peut relever que les rhéogrammes des remblais sont nettement au-dessus de ceux des résidus simplement épaissis. Ce dernier présente un seuil de cisaillement autour de 18 Pa et une viscosité de 0,23 Pa.s. Quant aux courbes d'écoulement des remblais, elles sont assez proches avec toutefois une légère élévation de la courbe du remblai à base de liant CP10 seul par rapport à celle du remblai avec 20CP10/80Slag. Les paramètres rhéologiques sont dans les mêmes ordres de grandeurs, soit autour 50 Pa pour le seuil de cisaillement et de 0,8 Pa.s pour la viscosité.

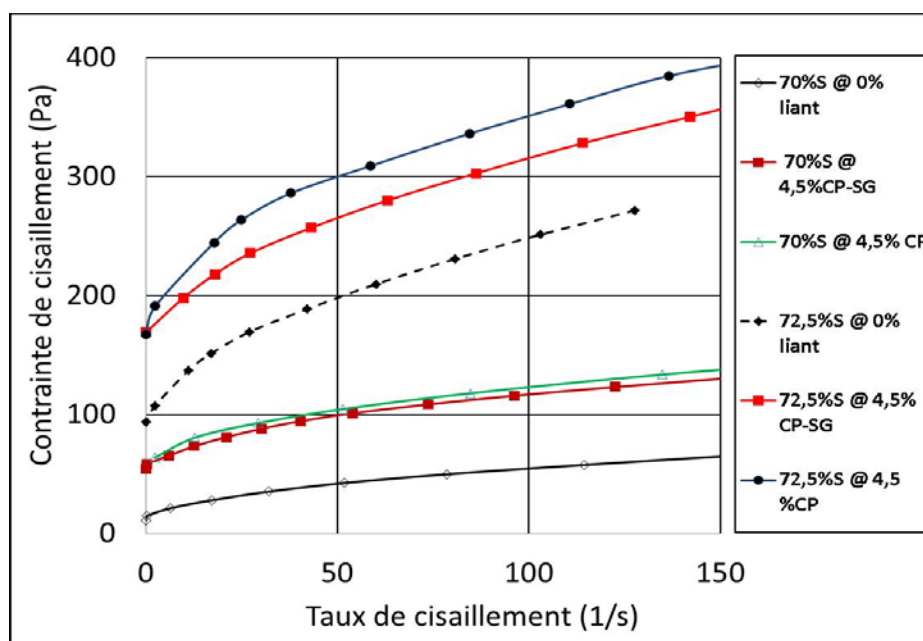


Figure 5.11 : Mise en évidence de l'effet des liants sur les paramètres rhéologiques.

L'effet de différents liants formés d'ajouts minéraux comme le laitier (SG), les cendres volantes (CV) et les filaires calcaires (FC) ajouté à des recettes de remblais Doyon à un pourcentage solide de 70% peut être observé sur la Figure 5.12 à travers leur courbe d'écoulement à 10 min

mesurées sur le viscosimètre ConTec. Sur cette figure, si les paramètres rhéologiques des remblais incorporant des ajouts minéraux sont dans les mêmes ordres de grandeurs (courbes plus ou moins superposées), le remblai à base de CP seul présente des paramètres nettement plus élevés.

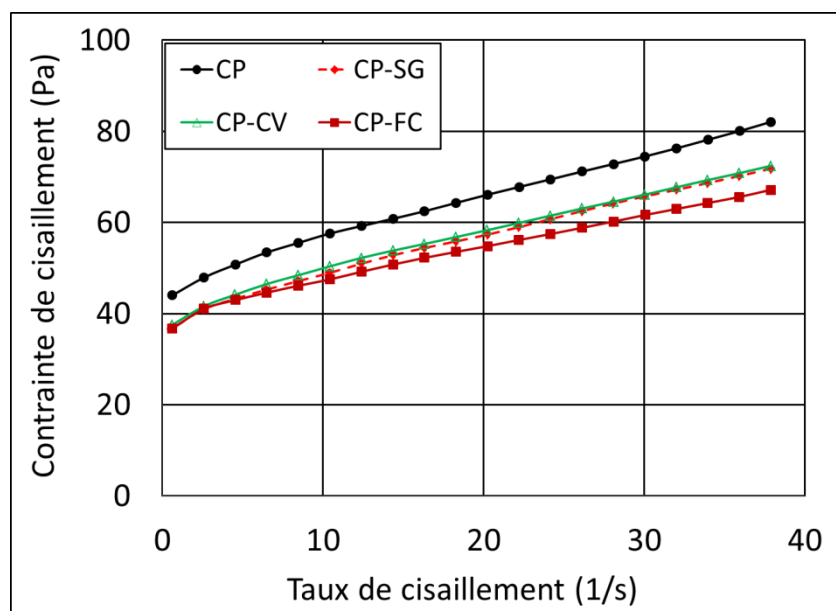


Figure 5.12 : Comparaison des courbes d'écoulement du remblai Doyon à 70% solide et 4,5% (CP, CP-SG, CP-CV et CP-FC) à 10 minutes d'âge avec le viscosimètre ConTec

L'analyse de l'effet du type de liant à travers l'ensemble de ces figures, indique que le liant constitué uniquement de ciment portland entraîne des propriétés rhéologiques moins favorables à l'écoulement tandis que les liants incorporant 80% d'ajouts minéraux (Laitier, cendres volantes et filaires calcaires) présentent des paramètres rhéologiques assez comparables entre eux et plus favorables à l'écoulement.

Considérant les remblais fabriqués à un pourcentage solide identique (70% S) avec un même type de liant (CP ou CP-SG) mais à des pourcentages différents dont les courbes d'écoulement sont représentées sur la Figure 5.13, il ressort que les paramètres rhéologiques connaissent une augmentation avec le pourcentage de liant quel que soit le liant considéré. Ainsi les paramètres

rhéologiques des remblais à 2% liant sont inférieurs aux paramètres rhéologiques des remblais à 4,5 % qui sont à leur tour inférieurs aux résultats des remblais à 6 % de liant.

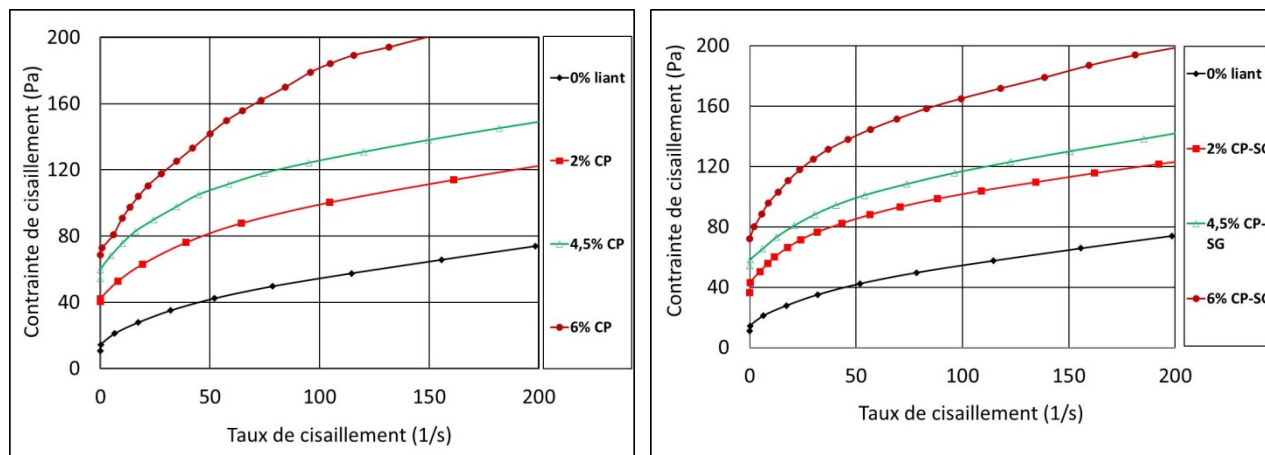


Figure 5.13 : Mise en évidence de l'effet du pourcentage de liant sur les paramètres rhéologiques de remblais Doyon à 70%S et 0%, 2%, 4,5% et 6% liant CP et CP-SG à 10 minutes d'âge.

5.6 Effet d'un superplastifiant sur la rhéologie des remblais de la mine Doyon

L'étude de l'effet de l'ajout d'adjuvant chimique réducteur d'eau sur la rhéologie des remblais miniers a été explorée de façon préliminaire dans ce projet. L'ajout de superplastifiant a été réalisé sur les remblais de la mine Doyon à forte concentration solide, soit 75%, avec un pourcentage de 6% de liant (CP et CP-Slag) et accessoirement 2% CP-SG. Le superplastifiant (SP) est un composé organo-chimique ayant des capacités d'agir sur les propriétés rhéologiques d'une suspension. Ce sont généralement des substances organiques avec des pôles hydrophiles et hydrophobes. Leur mode d'action varie d'un type à un autre, mais peuvent se résumer à deux : répulsions électrostatiques ou accroissement de l'eau.

Le superplastifiant utilisé dans cette étude est le Glenium 3030NS qui est un polycarboxylate de masse volumique de $1,09\text{g/cm}^3$. C'est un réducteur du rapport E/C de nouvelle génération ayant

des caractéristiques d'accroître la résistance mécanique des matériaux cimentaires, de réduire la quantité d'eau de gâchage pour un même affaissement, et d'augmenter le temps de prise des liants (confère fiche technique, BASF admixtures inc, 2006). Un volume de 6 ml de SP pour 3 l de remblai (soit un rapport de 2 ml de SP par litre de remblai), a été adopté pour la recette de 75 % de solides et 6 % de liant (CP10 et 20CP10/80Slag).

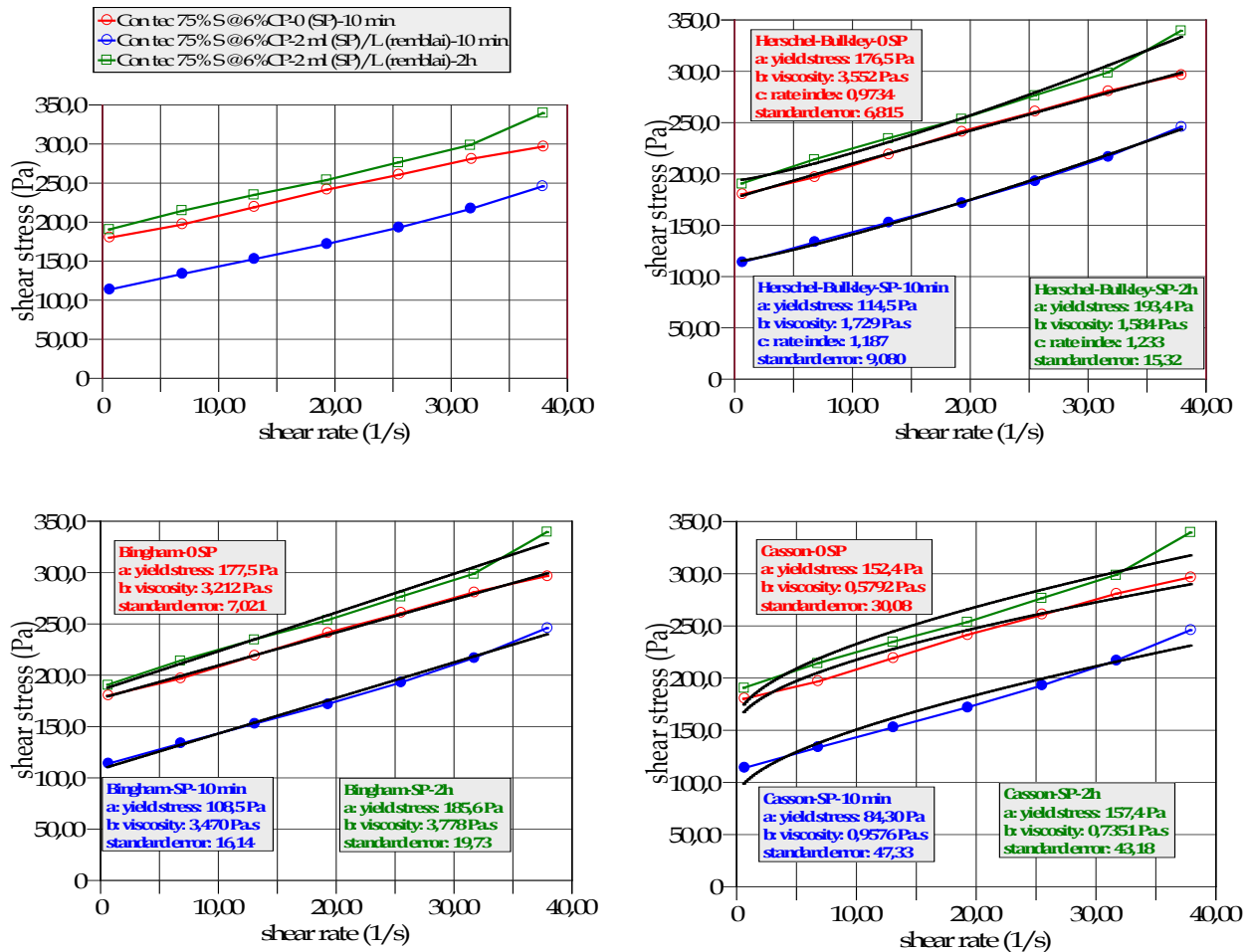


Figure 5.14 : Effet du superplastifiant Glenium 3030NS sur les courbes d'écoulement du remblais Doyon à 75% S @6% CP à 10 minutes et 2h mesuré par le viscosimètre Con Tec.

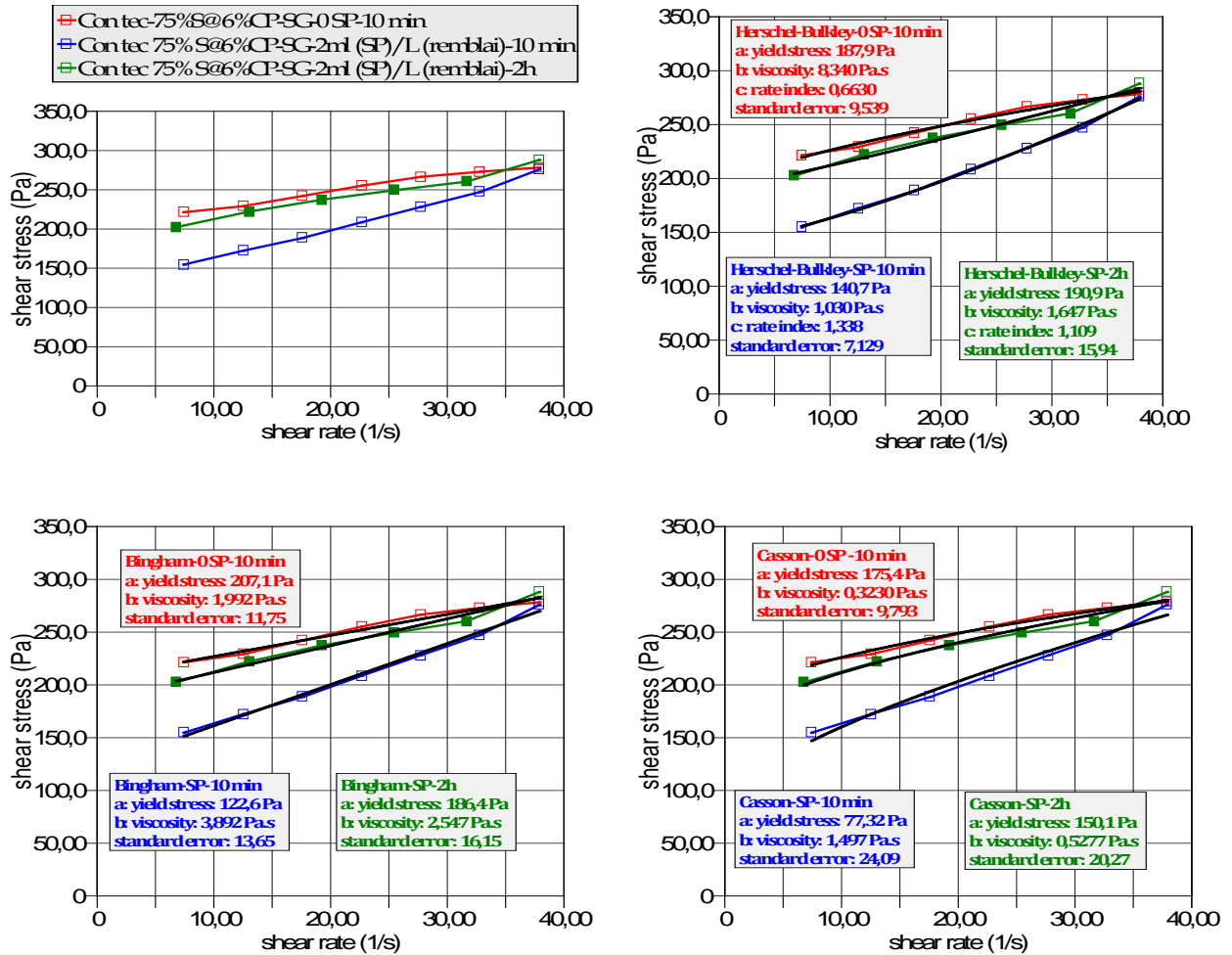


Figure 5.15 : Effet du superplastifiant Glenium 3030NS sur les courbes d'écoulement du remblai Doyon à 75%S et % CP-SG à 10 minutes et 2h mesuré par le viscosimètre Con Tec.

Le Tableau 5.2 présente la variation des paramètres rhéologiques des recettes à 75% de solide et 6 % de CP10 et CP-SG pour lesquelles le superplastifiant a été utilisé ainsi que l'affaissement correspondant selon les quantités utilisées.

Tableau 5.2 : Variation des paramètres rhéologiques selon le modèle de Bingham des recettes pour lesquelles le superplastifiant a été utilisé.

	SP (ml/L)	Seuil de cisaillement (Pa)	% de diminution	Viscosité (Pa.s)	affaissement (cm)
6% CP	0	194,6	43%	4,80	5,1
	2	110,85		3,47	8,2
6% CP-Slag	0	207,1	40%	2	5,4
	2	122,6		3,89	8,5

De manière générale, on remarque sur les Figures 5.14, 5.15 et 5.16 que l'ajout de superplastifiant agit sur les paramètres rhéologiques de manière différente. Ainsi le seuil de cisaillement baisse de manière remarquable tandis que la viscosité connaît une très faible diminution. En considérant le cas de 75 % solide et 6 % de liant CP seul, on constate que le seuil de cisaillement passe de 194,6 Pa pour le remblai avec 6% CP sans superplastifiant, à 108,5 Pa suite à l'ajout de 2 ml de SP/l de remblai soit une diminution de 43% tandis que les viscosités pour les mêmes recettes sont passées de 4,8 Pa.s à 3,47 Pa.s soit une diminution de 27 %. Quant au remblai avec CP-SG, le seuil de cisaillement est passé de 207 Pa dans la recette sans adjuvant à 122 Pa soit une diminution de 40% tandis que la viscosité est passée de 2 Pa.s à 3,8 Pa.s soit une augmentation de 90 %.

Les Figures 5.16 et 5.17 présentent le seuil de cisaillement et l'affaissement au petit cône en fonction du rapport volumique de super plastifiant ajouté au remblai. Les résultats de la Figure 5.16 corroborent l'effet de réduction du seuil de cisaillement induit par l'ajout de superplastifiant. On relève une augmentation de l'affaissement et une diminution du seuil de cisaillement ce qui se traduit par une diminution de la consistance donc un écoulement plus aisé du remblai. Pour les remblais à 75 % solide avec 6 % CP et CP-SG, l'affaissement est passé respectivement de 5,1 cm et 5,4 cm à 8,2 cm et 8,5 cm pour un rapport volumique de 2 ml de SP par litre de remblai. Pour le remblai à 75%S avec 2% 20CP10/80Slag, l'affaissement est passé de 5,2 cm sans SP à 8,9 cm suite à l'ajout de 2 ml/l de SP.

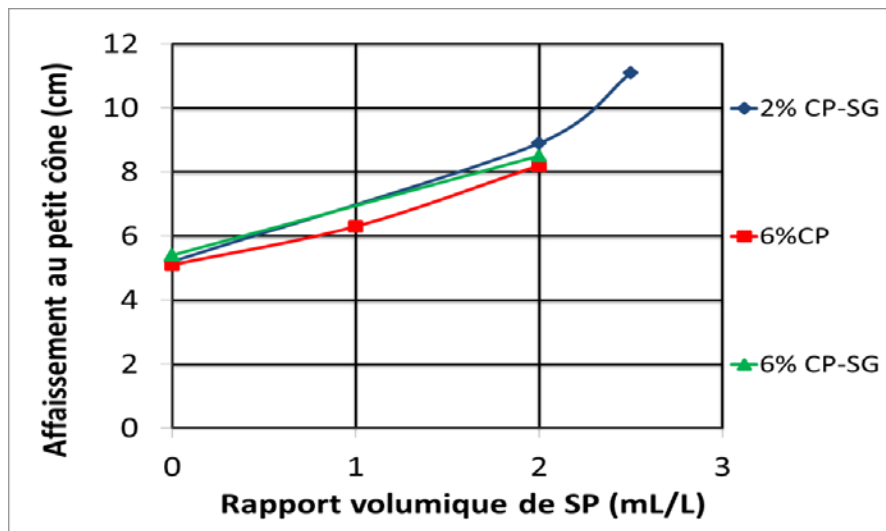


Figure 5.16 : Affaissement au petit cône en fonction du rapport volumique de superplastifiant.



a) Sans superplastifiant



b) Avec superplastifiant

Figure 5.17: Comparaison de l'affaissement au petit cône d'Abrams pour le remblai à 75 % de solides et 6 % de 20CP10/80Slag sans super-plastifiant (à gauche) et avec 2 ml /l de SP (à droite).

5.7 Détermination de la perte de charge à partir des paramètres rhéologiques sur l'écoulement.

Dans cette section, les paramètres rhéologiques obtenus expérimentalement seront utilisés pour accéder aux paramètres d'écoulement pour un système de transport de remblai qui sera préalablement défini. Ces calculs se fondent sur la procédure générale de Hallbom (2008) qui a proposé un diagramme de conception pour déterminer la perte de charge unitaire sur la base des données rhéologiques (voir section 1.3). En rappel, cette procédure consiste à déterminer le paramètre de perte de charge unitaire d'un écoulement dans un système donné en utilisant deux principaux groupes de nombres adimensionnels, dont chacun comporte une variable unique intervenant dans le calcul de perte de charge unitaire. Selon Hallbom (2008), la première fonction de la courbe d'écoulement est de saisir l'évolution de la perte de pression en fonction de la variation du débit d'écoulement. Partant de ce postulat, il a défini un nombre de Reynolds plastique Re_p dont la formule (voir équation 2.3) contient la variable de la vitesse d'écoulement mais ne contient pas celle de perte la de charge.

Le second groupe de nombre adimensionnel représenté par le nombre de contrainte (*stress number*) intègre la variable de perte de charge unitaire tout en excluant la variable vitesse. Il s'agit du nombre de Hallbom Ha défini par l'équation 2.52.

Le troisième nombre adimensionnel est représenté par l'exposant du taux de cisaillement (n) qui est à la fois indépendant de la vitesse et de la perte de charge unitaire et est obtenu directement par le modèle d'ajustement.

Dans cette étude, la perte de charge unitaire sera évaluée pour un système de remblayage selon quelques-unes des recettes étudiées en utilisant les paramètres ajustés au de Bingham, et pour un débit requis de 120t/h à distribuer dans une canalisation de 100 mm de diamètre. La valeur de la vitesse d'écoulement correspondant à cette exigence de débit est de 0,93 m/s pour les différentes recettes. Les principales étapes de cette procédure sont :

Étape 1 : À partir de la vitesse, on calcule le nombre de Reynold plastique Re_p (l'éq.2.3);

Étape 2 : Calcul du nombre de Hedström en utilisant l'équation (2.49) et les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique de Bingham) obtenus au Tableau 4.4.

Étape 3 : En fonction des valeurs de ce nombre de Hedström, en se référant au diagramme de la Figure 2.25, on détermine le nombre Ha selon les courbes des différents comportements rhéologiques c'est-à-dire en fonction de l'indice rhéologique (k) du modèle de Hallbom (équation 2.14, pour le cas particulier de Bingham $k=1$). Le nombre Ha est relié au nombre Re_p à travers le diagramme de conception de la Figure 2.25.

Étape 4 : Connaissant le nombre Ha , on déduit alors la perte de charge unitaire à partir de l'équation 2.52.

Tableau 5.3 : Calcul des pertes de charge de quelques recettes de remblais Doyon

%liant	Pourcentage de solides : 70 %		
	0 % de liant	4,5 % de CP10	4,5 % CP-Slag
η_B (Pa.s)	0,6	1,05	0,94
ρ_m (Kg/m ³)	1821	1826	1827
τ_0 (Pa)	23,52	49,29	44,12
D_i (m)	0,1	0,1	0,1
V (m/s)	0,9	0,9	0,9
k	1	1	1
H_e	1189,72	816,35	912,25
Re_p	273,15	156,51	174,92
H_a	4000	2500	2600
$\Delta P/L$ (Pa/m)	3163,1	6037,78	5029,79

À travers le Tableau 5.3, il ressort que conformément aux spécifications du système, les pertes de charge seront alors pour les résidus simplement épaissis, le remblai avec 4,5 % de CP10 seul et le remblai avec 4,5 % de 20CP10/80Slag respectivement de 3,16 kPa/m, 6,037 kPa/m et 5,029 kPa/m. Cela indique une augmentation de la perte de charge unitaire. Cette tendance semble conforme avec les observations faites par Cooke et al., (1992) dans leur étude où ils mentionnaient une augmentation de la perte de charge unitaire suite à l'ajout de liant au remblai hydraulique.

5.8 Comparaison des paramètres rhéologiques des résidus de Doyon et de LaRonde

La Figure 5.18 présente une comparaison des courbes d'écoulement des recettes des résidus provenant des mines Doyon et LaRonde afin de mettre en évidence l'influence des caractéristiques minéralogiques des résidus sur les paramètres rhéologiques. Sur cette figure, l'effet d'augmentation des paramètres rhéologiques suite à l'ajout de liant semble plus accentué pour les résidus de Doyon que pour les résidus de LaRonde. En effet, la courbe d'écoulement des deux résidus épaissis à 70 % de solides (sans ajout de liant) est assez comparable, avec un seuil de cisaillement inférieur à 20 Pa et une viscosité à l'infini autour de 0,2 Pa. Après l'ajout de liant, les courbes d'écoulement de remblai fait avec les résidus de Doyon sont nettement au-dessus des remblais à base des résidus de LaRonde. Cela peut s'expliquer par la nature des minéraux qui constituent les deux résidus. Das et al., (2010) ont par ailleurs relevé dans leur étude sur différents types de résidus que ceux comprenant plus de minéraux fins, notamment smectitiques, étaient sujets à présenter des viscosités plus élevées comparativement aux résidus grossiers riches en limonites et ou goethite. Cela peut s'appliquer à nos deux types de résidus, les résidus de la mine Doyon ayant un aspect argileux marqué par la présence de minéraux feuilletés comme la biotite, la muscovite à hauteur de 17,39 % contre 12,4 % pour les résidus de LaRonde. Les résidus de Doyon ont une proportion en albite plus élevée de l'ordre de 23 % dont l'altération produit des minéraux secondaires argileux. Cependant, la granulométrie des deux matériaux sont assez comparables (voir section 3.1.2).

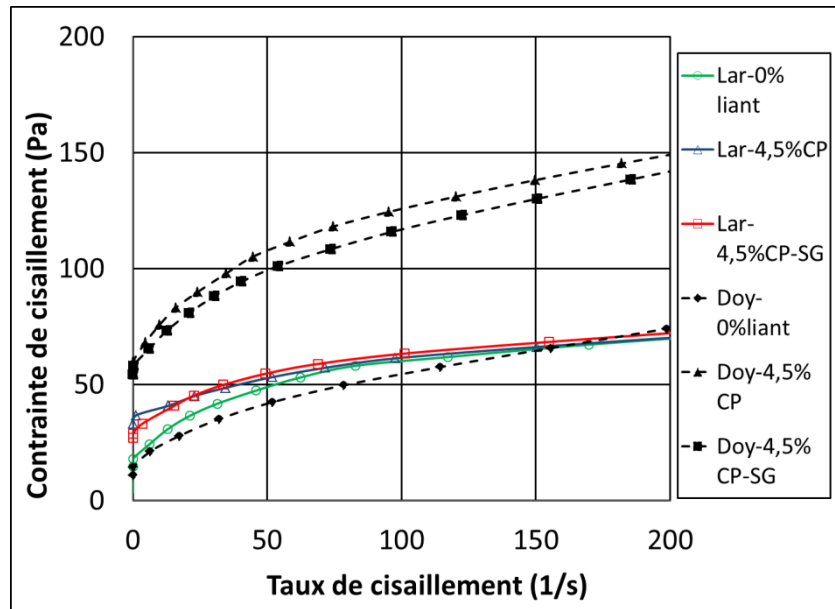


Figure 5.18: Comparaison des courbes d'écoulement des résidus Doyon et LaRonde épaissis à 70% Solide et de remblais à 70%S@4,5% liant (CP et CP-SG).

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'exécution du présent projet de recherche visait à déterminer les paramètres rhéologiques des résidus miniers densifiés à l'aide d'essais au rhéomètre et d'outils simples afin d'évaluer leur aptitude à s'écouler et/ou optimiser leur transport dans les pipelines. Le projet s'est orienté dans un premier temps vers la mise en place de procédures de mesure fiable des paramètres rhéologiques à travers des tests de contrôle de qualité, qui sont indispensables pour s'assurer de la précision des résultats obtenus lors des tests. Cette phase du projet a eu recours à l'utilisation de fluides de référence newtoniens et non-newtoniens qui ont été utilisés pour évaluer les procédures de mesure disponibles sur le rhéomètre AR 2000. Les courbes d'écoulement obtenues à partir du rhéomètre AR 2000 étaient en bon accord avec les résultats de référence émanant des fabricants de ces fluides. Les procédures qui ont fait l'objet d'évaluation étaient la procédure du *continuous ramp flow*, *steady state step flow* et *stepped flow step* pour le mode écoulement et les procédures de *frequency sweep* et *stress sweep* pour le mode dynamique. Les résultats du calibrage du rhéomètre ont permis d'effectuer le choix des procédures qui ont été par la suite validées par l'utilisation d'un autre rhéomètre sur des échantillons de remblais miniers. Une méthodologie fondée sur la mise en œuvre des trois procédures du mode écoulement associée à une série de traitement des courbes avant leur ajustement aux modèles rhéologiques incorporés dans le logiciel d'analyse des données rhéologiques, a été proposée. En définitive, les procédures en mode écoulement ont été validées par des résultats issus d'une autre géométrie montée sur un autre rhéomètre en l'occurrence le viscosimètre ConTec de l'Université de Sherbrooke. La comparaison des résultats obtenus par les deux appareils a permis de confirmer la qualité des mesures. En fait, les résultats du seuil de cisaillement et de la viscosité des recettes identiques de remblai obtenus par les deux appareils sont très proches lorsque déterminés par les mêmes modèles rhéologiques. De manière générale, les résultats sont assez comparables. Pour ce qui concerne cette étude, les conditions environnementales n'ont pu être prises en compte dans les résultats, bien que la salle de mesure ait connue quelques fluctuations de température.

En résumé, on peut retenir que le projet a permis de fixer les procédures de mesures des paramètres rhéologiques à l'aide du rhéomètre AR 2000. La procédure du *continuous ramp flow* est la procédure recommandée et la plus appropriée pour obtenir des résultats rapides et précis.

Dans la mise en œuvre de cette procédure, c'est la contrainte de cisaillement qui est le paramètre à faire varier et le taux de cisaillement est la variable enregistrée durant l'essai. Pour les résidus simplement épaissis à 70 % de solides, une plage de contrainte de 0 à 100 ou 150 Pa en mode écoulement linéaire ascendant et descendant pour échantillonner 20 points en 3 minutes 30 secondes est requise pour obtenir des résultats représentatifs du comportement du matériau. Pour les remblais, cette plage doit être légèrement étendue en raison de l'effet d'accroissement des paramètres rhéologiques occasionné par l'ajout de liants. Pour les remblais à fort pourcentage de solides supérieur à 72,5 % dans le cas des résidus de Doyon et 75 % de solides pour les résidus de LaRonde, il a été relevé des difficultés à obtenir des résultats probants sur les paramètres rhéologiques compte tenu de l'état pâteux qui rend difficile la mise en place des échantillons au niveau des géométries et le cisaillement des échantillons n'est pas toujours possible. Néanmoins, cela a pu être en partie résolu en utilisant le viscosimètre ConTec.

Après avoir fixé les procédures des tests rhéologiques et débarrassé les mesures de tout phénomènes perturbateurs, le projet a consisté à investiguer les effets d'un ensemble de facteurs incluant le pourcentage de solides massique des résidus, le type et le pourcentage de liant ajouté aux recettes de remblai, l'âge des remblais et l'effet d'un super-plastifiant sur les paramètres rhéologiques. Les tests ont porté principalement sur les résidus de la mine Doyon, mais en partie aussi sur les résidus de la mine LaRonde. De prime abord, il ressort que les paramètres rhéologiques des résidus densifiés sont reliés aux pourcentages de solides. Ainsi, les seuils de cisaillement et les viscosités des résidus épaissis à 70 % de solides sont inférieurs à ceux des résidus à 72,5 % de solides qui sont à leur tour inférieurs à ceux de 75 % de solides. Une croissance exponentielle du seuil de cisaillement est relevée tandis que l'évolution de la viscosité semble linéaire. Il ressort de manière évidente que pour un pourcentage solide donné, l'ajout de liant se traduit par une augmentation des paramètres rhéologiques. Cependant, les différences ne sont pas constantes et restent peu élevées. Les variations dans les caractéristiques des résidus rendent délicates les comparaisons d'essais réalisés à des périodes différentes.

Les paramètres rhéologiques ont été par la suite utilisés selon la démarche proposée par Hallbom (2008) et fondée uniquement sur les données rhéologiques, pour calculer les pertes de charge et la

vitesse d'écoulement des résidus de Doyon à 70 % de solides avec 0 et 4,5 % de liant (CP10 seul et 20CP10/80Slag). Les résultats ont montré une augmentation de la vitesse d'écoulement de transition entre l'écoulement laminaire et turbulent avec le seuil de cisaillement (section 5.8). Cela induit également une augmentation de la perte de charge.

Les tests de fluidité, courants dans le domaine minier, comme l'affaissement ou slump test au petit cône d'Abrams et d'autres tests novateurs comme le mini-cône d'écoulement et le *V-funnel* ont donné des résultats probants. Les résultats issus de ces mesures ont été corrélés avec les données du viscosimètre ConTec donnant ainsi des coefficients de corrélation acceptables (r de 0,93 à 0,99). Notons cependant que ces essais sont plus adaptés aux résidus épaissis et aux remblais ayant un pourcentage de solides autour de 70 % notamment pour la déposition en surface.

L'évaluation de l'effet du super-plastifiant *Glenium* dans les remblais à 75 % de solides a donné des résultats encourageant se traduisant par une réduction notable du seuil de cisaillement de ces matériaux même si l'effet sur la viscosité reste faible. Cela est d'autant plus intéressant que ce paramètre est important pour l'amorçage de l'écoulement des fluides non-newtoniens.

Finalement, en se fondant sur toutes les données collectées dans le cadre de cette étude, des recommandations et perspectives sont dégagées pour une amélioration de la pratique de la technologie de densification.

6.1 Recommandations

Il ressort de cette étude que les remblais à base de CP10/Slag ont des propriétés rhéologiques plus avantageuses pour un même pourcentage de solides des résidus et à une même proportion de liant comparativement aux remblais à base de CP10 seul (section 5.6). Cet avantage est par ailleurs renforcé par un gain en résistance mécanique plus marqué pour les remblais à base de CP10/Slag (voir section 5.4). Il revient alors clairement que l'utilisation du laitier dans le remblayage, jusque-là plus performant en termes de résistance mécanique et chimique (à cause de son effet

pouzzolanique), offre également de meilleures propriétés rhéologiques faisant de ce liant un choix mieux indiqué dans le domaine du remblayage minier.

6.2 Perspectives

Pour la suite de cette étude, une gamme plus complète de géométrie notamment les plaques parallèles de 25 mm de diamètre qui seraient plus adaptées pour des matériaux à forte concentration solide. Les procédures gagneraient plus en efficacité et en précision si le système de contrôle de la température de la salle du rhéomètre et le dispositif de prévention de l'évaporation au regard des faibles quantités d'échantillon utilisé donc plus sensible à l'effet de la température lorsque exposé à des variations de température.

Un autre aspect à étudier plus en profondeur est l'effet des superplastifiants (SP). L'étude exploratoire basée sur les résultats de l'utilisation du superplastifiant Gleniun 3030S a permis d'améliorer les propriétés rhéologiques de remblais à 75 % solide. L'effet d'amélioration de l'écoulement des remblais dû à cet adjuvant semble être plus accentué sur le seuil de cisaillement que sur la viscosité selon un temps plus ou moins long. Il apparaît alors essentiel de pouvoir poursuivre l'investigation de l'effet d'autres adjuvants à travers une étude systématique et aussi exhaustive que possible sur l'action intrinsèque des super plastifiants disponibles sur le marché après avoir effectué une sélection préliminaire mais rigoureuse en fonction des pratiques courantes. Cela permettra de déterminer les plus aptes à améliorer les paramètres rhéologiques des remblais par une optimisation plus approfondie au regard du chimisme complexe des résidus et remblais (pH, Eh, interaction métaux dissous et composés organiques) qui peut avoir de grande influences sur leur efficacité. Les éventuels impacts sur l'environnement notamment le potentiel d'oxydation et de relargage des métaux des remblais incorporant des adjuvants de même que leurs propriétés mécaniques pourront être évalués. Ces aspects feront l'objet de la suite des travaux qui seront exécutés dans le cadre du doctorat.

L'étude de l'effet de ces superplastifiants pourra intégrer la dimension économique à travers une analyse du cycle de vie complet d'une option de densification faisant recours aux superplastifiants et d'une autre option plutôt traditionnelle, c'est à dire n'utilisant pas de superplastifiant. Cela permettra de se fixer de manière solide sur l'élément coût qui revient le plus souvent comme handicap majeur à l'adoption de cette pratique dans le secteur minier.

BIBLIOGRAPHIE

American Society for Testing and Materials (ASTM-C143). (1996). Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, *Concretes and Aggregates*, Designation C143-90a.

Aubertin, M., & Chapuis, R. P. (1991a). Critères de conception pour les ouvrages de retenue des résidus miniers dans la région de l'Abitibi. *In Proceedings of the 1st Canadian Conference on Environmental Geotechnics*, Montreal, Que. Edited by M. Aubertin and R.P. Chapuis. The Canadian Geotechnical Society and the St-Lawrence Centre. pp. 113–127.

Aubertin, M., Bussière, B. & Bernier, L. (2002a). Environnement et gestion des résidus miniers [manual on CD-ROM]. Les Presses Internationales Polytechniques, École Polytechnique de Montréal, (Quebec).

Aubertin, M., Li, L., Arnoldi, S., Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M. & Simon, R. (2003). Interaction between backfill and rock mass in narrow stopes. *In Proceedings of 12th Panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering and 39th U.S. rock mechanics symposium*. 22–26 June. Boston. Massachusetts. USA. vol 1. Verlag Glückauf GmbH. Essen, 1157–1164.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Jolette, D., Bussière, B., Chapuis, R. P., James, M., & Riffon, O. (2002b). Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle [CD-ROM] *In Symposium 2002 on Mining and the Environment: Challenges and Prospects*, Rouyn-Noranda, Que., 3–5 November 2002. Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum, Papers32a1019p526.

Barnes, H. A & Bell, D. (2003). Controlled-stress rotational rheometry: An historical review. *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol, 15 (4), 187-196.

Barnes, H A., Hutton, J. F. and Walters, K. (1989). *An introduction to Rheology*, Elsevier, 199 p Amsterdam.

Barnes, H. A., and Nguyen, Q. D. (2001). Rotating vane rheometry-a review. *Journal of Non Newtonian fluids mechanics*, 98, 1-14.

Barsotti, C. (1978). The evolution of fill mining at the Ontario Division of Inco Metals. *In Proceedings of the 12th Canadian Rock Mechanics symposium, Mining with Backfill, CIM special volume 19*: 37–41.

BASF admixtures inc, (2006). Fiche technique du produit GLENIUM 3030 NS.

Baudez J. C. (2001). Rhéologie et physico-chimie des boues résiduelles pâteuse pour l'étude du stockage et de l'épandage. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.

Belem, T. et Benzaazoua, M. (2003). Utilisation du remblai minier en pâte comme support de terrain. Partie I comportement à court, à moyen et à long terme. *In Proceedings of Après-mines 2003. Impacts et gestion des risques : besoins et acquis de la recherche*. 5–7 February. Nancy. GISOS. CD-ROM.

Belem, T. & Benzaazoua, M. (2008). Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, (2), 147-174.

Belem, T., Aubertin, M., Benzaazoua, M. & Mbonimpa, M. (2009). Notes du Cours de GNM 1002 - Remblais miniers. UQAT – École Polytechnique de Montréal, 2009.

Belem, T., Fourie, A., Fahey, M. (2010). Measurement of volume change in cemented mine backfills at early ages. *In Proceedings of 1st International Seminar on Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste – Mine Waste'10*, 29 sept - 1st oct 2010, Perth, WA, Australia, 14 p.

Benzaazoua, M. & Belem T. (2003). Utilisation du remblai minier en pâte comme support de terrain. Partie II comportement à court, à moyen et à long terme. *In Proceedings of Après-mines 2003. Impacts et gestion des risques: besoins et acquis de la recherche*. 5–7 February. Nancy. GISOS. CD-ROM.

Benzaazoua, M. Fall, M. & Belem T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17, 141–152.

Buckingham, E. (1922). On plastic flow through capillary tubes. *Proceedings of the A.S.T.M.*, 21, p. 1154

Bodi, L., Hunt G. & Lahnalampi T. (1996). Development and shear strength parameters of paste backfill. *In Proceedings of the 3rd International Conference on Tailings and Mine Waste'96, Fort Collins, Colorado*, 16-19 January. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 169–178.

Bouzaïene R. (1995). On the flow mechanics of mine backfill slurries in pipeline. Ph D Thesis of Mc Gill Université.

Bussière, B. (2007). Colloquium 2004. Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal* 44, (9), 1019-1052.

Château, X. (2007). Cours de rhéologie sur l'écoulement de matériaux compliqués. École Rhéologie- consolidation et blocage de l'école Nationale des Ponts et Chaussée. 28 mai-01 juin 2007.

Chougnat, A., Audibert, A. et Moan, M. (2007). Linear and non-linear rheological behavior of cement and silica suspensions. Effect of polymer addition. *Rheologica acta* 46:793-802.

Churchill, S. W. (1977). Friction factor equation spans all fluid flow regimes. *Chemical Engineering*, 84 (24) 9 1.

Clark, C. C, Vickery, J. D, Backer, R. R (1995). Transport of total tailings paste backfill: results of full-scale pipe test loop pumping tests. Report of investigation, RI 9573, USBM, 37 pp

Clayton, S., Grice, T. G., Boger, D. V., (2003). Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, 70, 3–21.

Cooke, R. (2001). Design procedure for hydraulic backfill distribution systems. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 101 (2) 97-102.

Cooke, R. (2007). Backfill Pipeline Distribution Systems – Design Methodology Review Minefill 2007. Montréal Québec Canada.

Cooke, R. (2009). Pipeline design for paste and thickened tailings system, *Tailings and mine waste 2008*, Denver Colorado, USA.

Cooke, R., Spearing, A. J. S., & Gericke, D. (1992). The Influence of Binder Addition on the Hydraulic Transport of Classified-Tailings Backfill. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 92, (11/12) 325–329.

Coussot, P. & Ancey, C. (1999). *Rhéophysique des pâtes et suspensions*. EDP Sciences, 264 p.

Coussot, P. & Boyer, S. (1995). Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test. *Rheologica Acta*, 34, 534-543.

Coussot, P. (2005). *Rheometry of pastes, suspensions and granular materials*. Wiley. New York.

Coussot, P. & Roussel, N. (2006). Quantification de la thixotropie des matériaux cimentaires et ses effets. *Revue Européenne de Génie Civil*. 10/1 : 45-63.

Cox, W. R. & Merz, E. H. (1958). Correlation of dynamic and steady viscosities. *Journal of Polymer Sciences* 28, 619-622

Daas, M., Srivastava, R. (2008). Sensitivity analysis of the influence of slurry characteristics and pipe size on Wasp model's accuracy. *Powder Technology*, 185 (1) 36-42.

Darby, R. (1984). Determination and utilization of rheological properties for prediction of flow behavior of pseudohomogeneous slurries. *In Proceedings of the 9th International. Technical Conference on Slurry Transportation*, Lake Tahoe, pp. 107-115.

Das, G. K., Kelly, N. & Muir, D. M. (2010). Rheological behaviour of lateritic smectite ore slurries, *Mineral Engineering*.(2010), doi:10.1016/j.mineng.2010.08.011. in press.

Davies, D. A., & Stokes, J. (2008). Thin film and high shear rheology of multiphase complex fluids *J. Non-Newtonian fluid mechanical* 148, 73-87.

De Souza, E. & Dirige A. P. (2003). An integrated approach for the design of stable mine backfill sillmats. *Structures and Materials*. 12, 303-312.

Diouf B. (2005). Caractérisation des propriétés rhéologiques des remblais miniers en pâtes cimentés (RMPC). Rapport de stage.

Doraiswamy D, Mujumdar AM, Tsao I, Beris AN, Danforth SC, & Metzner AB (1991). The Cox-Merz rule extended: a rheological model for concentrated suspensions and other materials with a yield stress. *Journal of Rheology* 35, 647-585.

Duckworth, R. A., Pullum, L., Lockyear, C. F. and Addie, G. R. (1986). The pipeline transport of coarse materials in a non-Newtonian carrier fluid, *10th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Hydrotransport 10*, Innsbruck, October.

Durand, R., and Condolios, E., (1952). Hydraulic transport of coal and solid materials in pipes", *Proceedings of a colloquium on the hydraulic transport of coal*, pp.39-52, National Coal Board, London, England.

Eberl E., & Eberl, U. (1995). Parameters of transport of non-newtonian fluid through the pipes, *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, 7, 65-69.

Einstein, A. (1906) *Ann. Phys., Lpz*, 19, 289,

Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. & Alp, I. (2010). Utilization of water-reducing admixtures in cemented paste backfill of sulphide-rich mill tailings, *Journal of Hazardous Materials*, 179, 940–946.

Evangelou, (1995). A review: Pyrite oxydation mechanisms and acide mine drainage prevention, *Critical Reviews of Environment Science and Technology*, 25, (2) 141-199.

Ferraris, F. C., & De Larrard (1998). Modified slump test to measure rheological properties of fresh concrete. *Cement concrete and agregates*. Vol 20, (2) 241-247.

Feys, D., Verhoeven, R., & Schutter, G. D. (2007). Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self compacting concrete. *Applied Rheology*, 17 (5) 56244-1-56244-10.

Fitton, T. (2007). Tailings beach slop prediction. Ph.D Thesis of University of British Colombia.

Forster, E. O. & Kolfenbach, J. J. (1959). Viscoelastic behavior of greases. N.L.G.I. *Spokes-man* (9) 215-230.

Gawu, S. Y. & Fourie, A. B. (2004). Assessment of the modified slump test as a measure of the yield stress of high-density thickened tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 39–47.

Ghezzehei, T. A. & Or, D. (2001). Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses, *Soil Science Society of America Journal*, 65: 624–637.

Giguère, R., Fradette L., Mignon, D., Tanguy, P. A. (2008). Characterization of slurry flow regime transitions by ERT. *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (9): 989-996.

Gillies R. G., Sun R., Sanders R. S. & Schaan J. (2007). Lowered expectations: the impact of yield stress on sand transport in laminar, non-Newtonian slurry flows, *Journal of southern African institute of mining and metallurgy*, vol 107, 351-357.

Gillies, R. G., Shook, C. A. & Wilson, K. C (1991). Improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 69 (1): 173-178.

Goudoulas, T. B., Kastrinakis, E. G. & Nychas, S. G. (2003). Rheological aspects of dense lignite-water suspensions; time dependence. preshear and solids loading effects. *Rheologica Acta*, 42, 73-85.

Govier, G. W. & Aziz, K., (1987). The flow of complex mixtures in Pipes. Krieger Publishing Company.

Gowan, M. J. and Williams, D. A. (2002). Benefits of Utilising an Increased Tailings Slurry Density. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*.

Hallbom, D. J. (2008). Pipe flow of homogeneous slurry. Ph. D Thesis of university of British Columbia.

Hanks, R. W.; (1963). The laminar-turbulent transition for flow in pipes, concentricannuli, and parallel plates; *A.I.Ch.E. Journal*, January, pp. 45-48.

Hébraud, P. & Lootens, D. (2005). Concentrated suspensions under flow: shear thickening and jamming. *Modern Physics Letters B*. 19 (13 & 14): 613-624.

Hill, K. B. (2006). Pipeline Flow of Coarse Particles in Fluids with Yield Stresses, Ph D Thesis of Université of Saskatchewan.

Hourman, J. and Johnson, G. (2002). High density disposal of co-thickened kimberlite slurry using positive displacement pumps- a case study. *15th International Conference on Hydrotransport*, Banff, Canada.

http://thermexcel.com/french/tables/eau_atm.htm: site web consulté le 12-novembre 2010.

Huynh, L., Beattie, D. A., Fornasiero, D. & Ralston, J. (2006). Effect of polyphosphate and naphthalene sulfonate formaldehyde condensate on the rheological properties of dewatered tailings and cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 19, (1) 28-36.

Ismail, H. M. (1952). Turbulent transfer mechanism and suspended sediment in closed channels, *Trans. ASCE*, V.II7, pp. 409-447.

James, A. E., Williams, D. J. A. & Williams, P. R. (1987). Direct measurement of static yield properties of cohesive suspensions, *Rheologica. Acta* 26: 437-446.

Jewell, R. J., Fourie, A. B., & Lord, E. R. (eds) (2002): Paste and thickened tailings – A guide. The Australian Centre of Geotechnics. The University of Western Australia. Nedlands, Western Australia.

Kaplan, D. (2001). Pompage des bétons, thèse de doctorat du laboratoire central des ponts et chaussées 228p.

Kaushal, D. R., & Tomita, Y. (2002). Solids concentration profiles and pressure drop in pipeline flow of multisized particulate slurries. *International Journal of Multiphase Flow*, 28 (10) 1697-1717.

Keating, J. and Hannant, D. J. (1989). The effect of rotation rate on gel strength and dynamic yield strength of thixotropic oil well cements measured using a shear vane. *Journal of Rheology*, 33, 1011–1020.

Kesimal, A., Yilmaz, E. & Ercikdi, B. (2004). Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents. *Cement and Concrete Research*, 34 (10) 1817-1822.

Koehler, E. P., Fowler, D. W., Ferraris F. C. (2003). Summary of concrete workability test methods. ICAR 105 : measuring the workability of high fines concrete. *International center for aggregates research*.

Konan, L. K. (2006). Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium. Thèse n°32 de doctorat de l'université de Limoges.

Kwak, M., James, D. F. & Klein, K. A (2005). Flow behaviour of tailings paste for surface disposal. *International Journal of Mineral Processing*, 77, 139–153.

Labiausse, V. (2004). Rhéologie non linéaire des mousses aqueuses. Thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée.

Landriault D. A., Verburg R., Cincilla W. & Welch D. (1997). Paste technology for underground backfill and surface tailings disposal applications. Short course notes, Canadian Institute of

Mining and Metallurgy, Technical workshop—April 27, Vancouver, British Columbia, Canada, 120p.

Landriault, D. A. (1992). Paste fill at Inco. *In Proceeding of the 5th International Symposium on Mining with backfill*, Johannesburg, South Africa, September.

Landriault, D. A. (1995). Paste backfill mix design for Canadian underground hard rock mining. *In Proceedings of the 97th Annual General Meeting of the C.I.M. Rock Mechanics and Strata Control Session*, Halifax, Nova Scotia, May 14-18.

Landriault, D. A. & Lidkea, W. (1993). Paste fill and high density slurry fill. *In Proceedings of the International Congress on Mine Design, Queens University, Kingston, Ontario, Canada*, August.

Landriault, D.A. & Tenbergen, R. (1995). The present state of paste fill in Canadian underground mining. *In Proceedings of the 97th Annual Meeting of the CIM Rock Mechanics and Strata Control Session*, Halifax, Nova Scotia, May 14-18.

Landriault, D.A. & Lidkea, W. (1993). Paste fill and high density slurry fill. *In Proceedings of the international congress on mine design*. Queens University. Kingston. Ontario. Canada.

Legrand, C. (1972). Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais. *Matériaux et constructions*, 30 (5) 379-393.

Li, M., Bernier, L., & Boucher, J. F. (2002). Rheology of mineral pastes and its implications on underground pipeline delivery [CD-ROM]. *In Symposium 2002 on Mining and the Environment:*

Challenges and Prospects, Rouyn-Noranda, Que, 3–5 November 2002. Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum.

Litzenberger, C. G. (2004). Rheological study of kaolin clay slurries. Master Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Department of Chemical Engineering.

Macosko, C. W. (1994). *Rheology, principles, measurements, and applications*, Wiley-VCH.

Mas, R. & Magnin, A. (1996). Expérimental validation of steady shear and dynamic viscosity relation for yield stress fluids. *Rheologica Acta*, 36, 49-55.

Matousèk, V. (2002). Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes. *Experimental thermal and Fluide Sciences* 26, 693–702.

Matousèk, V. (2005). Research developments in pipeline transport of settling slurries. *Powder Technology* 156, (1) 43-51.

Matousèk, V. (2009). Predictive model for frictional pressure drop in settling-slurry pipe with stationary deposit. *Powder Technology* 192 (3) 367-374.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M & Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian. Geotechnecnic . Journal.* 40: 916–932.

McCarty, D. F. (2007). *Essentials of soils Mechanics and Foundations : Basic geotechnics*, 7th ed., Pearson Prentice hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 850p.

Meggyes, T. (2006). Pastes and Thickened Tailings technology. *Federal Institute for Materials Research and Testing*, BAM.

Metzner, A. B. Reed, J. C. (1955). Flow of non-Newtonian fluids – correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions; *A.I.Ch.E. Journal*, 1 (4) pp. 434-440.

Mohamadbeigy K. (2005). Studies of effectiveness parameters on slurry transfer. *Petroleum and Coal*, 47 (3) 6.

Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. Transactions of the A.S.M.E (November), pp. 671-684.

Murata J. (1984). Low and deformation of fresh concrete. *Materials and construction*, 17, 117-119.

Nachbaur, L., Mutin, J. C., Nonat, A., Choplin, L. (2001). Dynamic mode rheology of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting. *Cement and Concrete Research* 31, 183–192.

Naylor, J., Farmery, R. A. and Tenbergen, R.A. (1997). Paste backfill at Macassa mine with flash paste production and storage mechanism. Proc. 29th ann. Meeting of CMP, CIM, Ottawa, Paper 30, pp. 407-420.

Newitt, R. D. M., Richardson, J. F., Abbott, M. and Turtle, R. B. (1955). Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes. *Transport. Institut and Chemistry Engineers.*, 33, (2), pp 9-113.

Nguyen, Q. C. & Boger, D. V. (1985). Direct yield Stress Measurement with the Vane method. *Journal of Rheology*, 29 (3) 335 – 947.

Nguyen, Q. C. & Boger, D.V. (1983). Yield stress measurement for concentrated suspensions. *Journal of Rheology.*, 27, 321–349.

Ouattara, D., Mbonimpa M., Belem, T. (2010). Rheological properties of thickened tailings and cemented paste tailings and the effects of mixture characteristics on shearing behavior. *In Proceedings of 63rd Canadian Geotechnical Conference & 1st Joint CGS/CNC-IPA Permafrost Specialty Conference*, 12-16 September 2010, Calgary, AB, pp. 1178-1185.

Pahias, N. & Boger, D. V. (1996). A fifty cent rheometer for yield stress measurement, *Journal of Rheology*, 40(6), 1179-1189.

Paterson, A. J. C., Williamson, J. R. G. & Salas, U. O. (2004). Hydraulic transport considerations for high density thickened copper tailings at Southern Peru Copper Corporation. *In proceedings of Hydrotransport 16th International Conference*, 26-28 April Santiago de Chili BHR group limited 1: 13-24.

Pullum, L. (2007). Pipelining tailings, pastes and backfill. Keynote address. *In Proceedings of 10th international seminar on paste and thickened tailings*. 13–15 March. Perth. Australia

Pullum, L. & Graham, L. J. W. (2000). The use of magnetic resonance imaging (mri) to probe complex hybrid suspension flows. *10th Transport and Sedimentation Conference*, Wroclaw, Poland, September.

Pullum, L. & Graham, J. W. (2007). Centrifugal pump performance calculation for homogeneous and complex heterogeneous suspensions, *The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*. *Hydrotransport 17*, Cape Town, South Africa, May.

Pullum, L., Graham, J. W. & Slatter, P. (2004a). A non-Newtonian two layer model and its application to high density hydrotransport, *16th International Conference on Hydrotransport, Santiago, Chile*.

Putzmeister, (1999). High-density solids pump, design and application, 54p

Ragouilliaux, A., Herzhaft, B., Bertrand, F. & Coussot, P. (2006). Flow instability and shear localisation in drilling mud. *Rheologica Acta*, 46, 261-271.

Robinsky, E. I., (1975). Thickened discharge – a new approach to tailings disposal, *Canadian Mining Metallurgy Bulletin*., 68, pp 47-53.

Robinsky, E. I. (1999). Tailings dam failures need not be disasters – The thickened tailings disposal (TTD) system. *CIM Bulletin*, 92, (1028). 140 – 142.

Robinsky, E. I. (1999). Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry. E.I. Robinsky Associates Ltd., Toronto, Canada.

Roussel, N. & Coussot, P. (2005). Fifty-cent rheometer for yieldstress measurements: from slump to spreading flow. *Journal of Rheology*, 49, (3) 705–718.

Sellgren, A., & Wilson, K. C. (2007). Validation of a four-component pipeline friction loss model, *Proceedings, The 17th international conference on the hydraulic transportation of solids in pipes, Hydrotransport 17, Cape Town, South Africa, May*, pp 193-204.

Shaughnessy, R. & Clark, P. E. (1988). The rheological behaviour of fresh cement pastes, *Cement Concrete Research*, 18, 327–341.

Shook, C. A. & Roco, M. C., (1991). *Slurry flow. Principles and practice*, Butterworth-Heinemann, USA.

Shou, G., Matínez, M. (2003). Feasibility of using centrifugal pumps to transport thickened tailings. 2003 *International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. 14-16 May 2003. Melbourne, Victoria, Australia. Section 10. 1-10.

Sinclair, C. G. & McNaughton K. J (1965). The residence time probability density of complex flow systems, *Chemical Engineering Science* 20(4): 261-264.

Skudarnov, P. V., Lin, C. X. & Ebadian M. A. (2004). Double-species slurry flow in a horizontal pipeline. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME* 126 (1) 125-132.

Slatter, P. T. & Wasp, E. J. (2000). The laminar/turbulent transition in large pipes". *10th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles*; Wroclaw, Poland, September, pp. 389-399.

Sofra, F. & Boger, D. V. 2002. Environmental rheology for waste minimization in the minerals industry *Chemical Engineering Journal*, 86, 319–330.

Spelay R B. (2007). Solids transport in laminar open channel flow of non Newtonian slurries, Ph.D Thesis of Saskatchewan University.

Stone, D.M.R. (1993). The optimization of mix designs for cemented rockfill. *In Minefill'93. Proceedings of 5th International Symposium on Mining with Backfill*. Johannesburg, SAIMM, pp. 249–253.

Sundqvist, Å., Sellgren A., & Addie, G. (1996). Slurry pipeline friction losses for coarse and high density industrial products. *Powder Technology*, 89, (1) 19-28.

TA Instruments rheology manuals édition 2007.

Tenbergen, R.A. (2000): Paste dewatering techniques and paste plant circuit design. *Tailings and Mine Waste 2000*. Balkema. Rotterdam. 75-84.

Thomas, A. D. (1979). Settling of particles in a horizontally sheared Bingham plastic, *first National Conference on Rheology*, Melbourne.

Thomas, A. D. & Wilson K. C (1987). New analysis of non-Newtonian turbulent flow-yield power-law fluids. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 65(2): 335-338.

Thomas, A. D., Pullum, L. & Wilson, K. C. (2004). Stabilised laminar slurry flow: Review, trends and prognosis, *16th International Conference on Hydrotransport*. Santiago, Chile.

Thomas, D. G. (1965). Transport characteristics of suspensions: part VII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles. *Journal of Colloid Science*, 20, pp. 267-277.

Turian, R. M. & Yuan, T., (1977). A flow of slurries in pipelines; *AIChE Journal*, Vol. 23,#3

Uhlherr, P. H. T., Park, K. H., Tiu, C. & Andrews, J. R. G. (1984). Yield stress from fluid behaviour on an inclined plane. In *Advances in Rheology*, ed. B. Mena, A. Garcia-Rejon, C. Rangel-Nagaile, 2: 183–190. Mexico City: Univ. Nac. Auton. Mex.

Ulusarslan, D. (2008). Comparison of experimental pressure gradient and experimental relationships for the low density spherical capsule train with slurry flow relationships. *Powder Technology 185(2): 170-175.*

Vick, S. G. (1990). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams.* BiTech Publishers Ltd. Vancouver, B.C.

Viles, R. F., Davis, R. T. H. & Boily, M. S. (1989). New material technologies applied in mining with backfill. In *Innovation in Mining Backfill Technology.* Edited by F. Hassani et al., A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 95–101.

Warman International (2000). *Slurry pumping handbook, Australasian version 2000.* 82p.

Wasp, E. J., Kenny, J. P., & Gandhi, R. L., (1977). *Solid Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation, first ed. Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.*

Wilson, K. C. (1976). A unified physically-based analysis of solid-liquid pipeline flow. *Hydrotransport 4, Cranfield, England,*

Wilson, K. C. & Thomas, A. D. (1985). A new analysis of the turbulent flow of non-Newtonian fluids, *Canadian Journal of Chemical Engineering, 63,* pp 539-546.

Wilson, K. C. & Horsley R. R. (2004). Direct prediction of fall velocities in non-Newtonian materials. *International Journal of Mineral Processing 71, (1-4) 17-30.*

Wilson, K. C., Addies G. R., Sellgren, A., Clift, R. (2006). *Slurry transport using centrifugal pumps, third edition-Springer sciences + bussiness media inc 233 spring street New York 10013 NY USA 432 p.*

Wilson, K. C., Clift, R., Sellgren, A., (2002). Operating points for pipelines carrying concentrated heterogeneous slurries, *Powder Technology* 123, 19–24.

Wilson, K. C.; Thomas, A. D. (2006). Analytic model of laminar-turbulent transition for Bingham plastics, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 84 (5), pp. 520-526.

Xu, Q. & Stark, J. 2005. Early hydration of ordinary Portland cement with an alkaline shotcrete accelerator, *Advances in Cement Research*, 17 1, 1–8.

Yahia. A. & Khayat, K. H., (2001). Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout, *Cement and Concrete Research*, 31, (5), pp.731–738,.

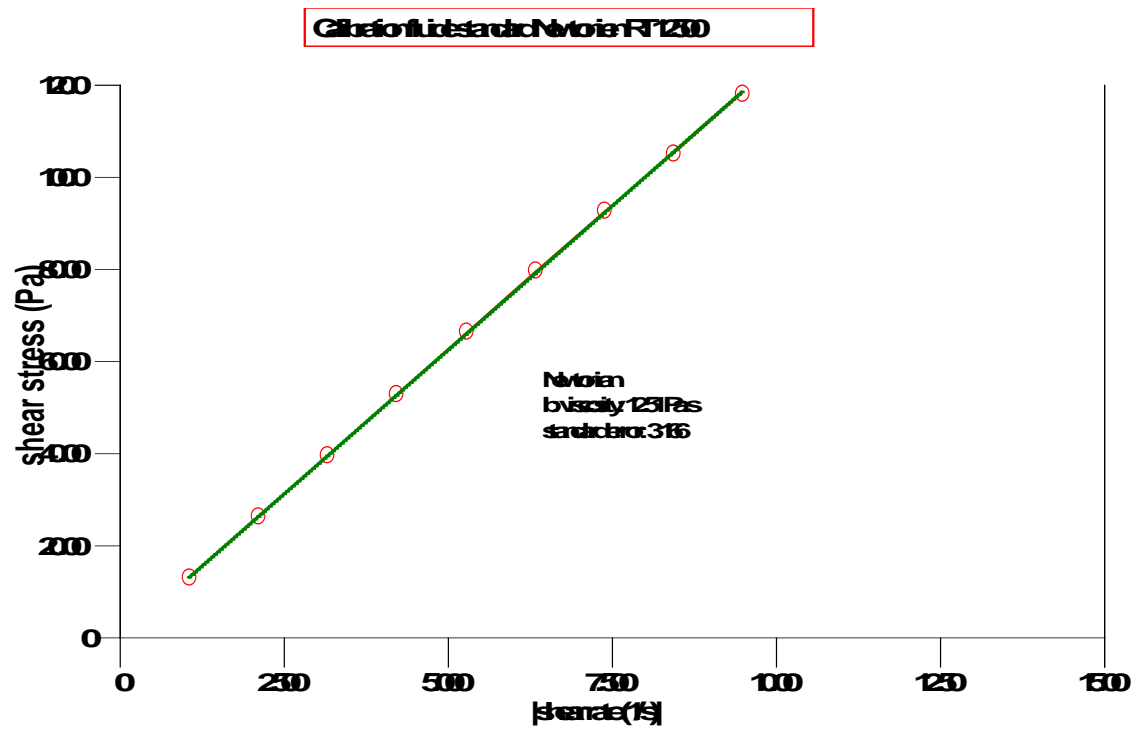
Yang, M., & Jennings, H. M. 1993. On the development of rheological properties of cement paste during the induction period. In L.J. Struble, C.F. Zucoski, G.C. Maitland (Eds.), *Materials Research Society Symposium Proceedings* 289, Pittsburgh, PA, USA, 180–190.

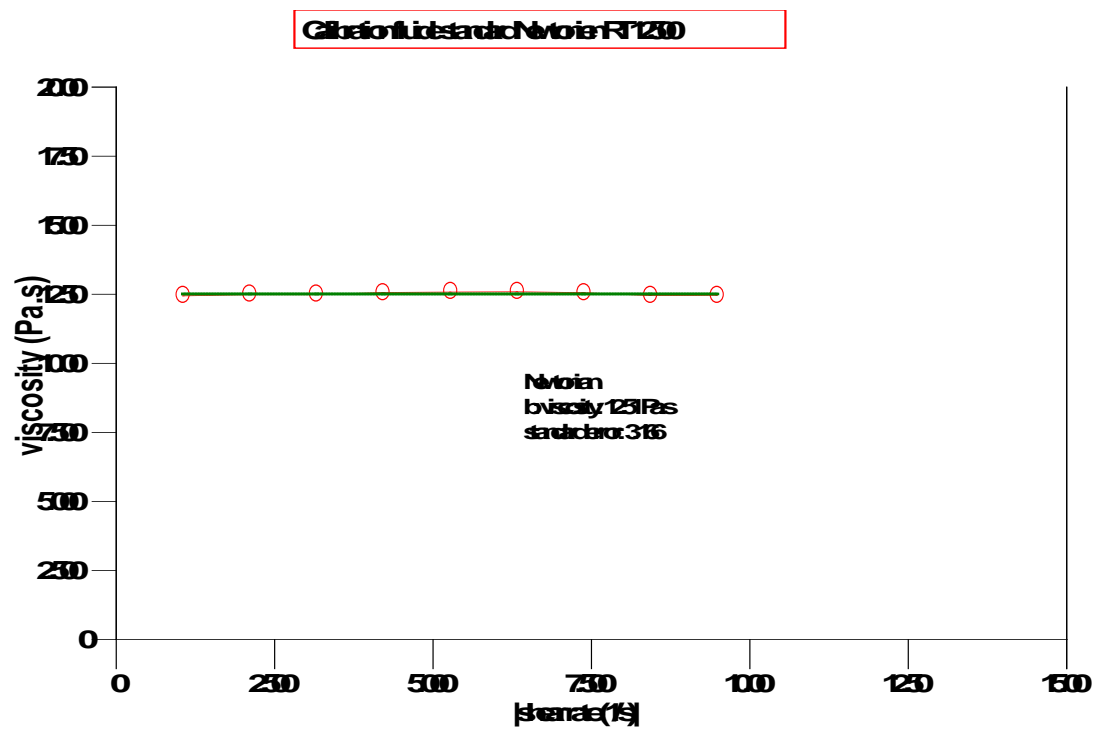
Yoshimura, A. S., Prud'homme, R. K., Princen, H. M. and Kiss, A. D. (1987). A comparison of techniques for measuring yield stresses. *Journal of Rheology*,. 31, 699–710.

ZHANG, Q-I, HU, G. WANG, X. (2008). Hydraulic calculation of gravity transportation pipeline system for backfill slurry *Journal of Central South Univerty Technology*, 15, 645–649.

ANNEXES

Annexe 1 : Ajustement des courbes d'écoulement des fluides standards Newtoniens





Annexe 2 : Données de référence du fluide NNTF1 fournies par la compagnie de production du fluide de référence PTB

Fiche de certification de la qualité du fluide standard NNTF1

Physikalisch-Technische Bundesanstalt		PTB
Braunschweig und Berlin		
		
Prüfbericht		
<i>Test Report</i>		
Gegenstand: <i>Object:</i>	Nicht-newtonsche Referenzflüssigkeit der Viskosität Non-Newtonian reference liquid for viscosity	
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig	
Typ: <i>Type:</i>	NNTF 1	
Gerätenummer: <i>Serial No.:</i>		
Auftraggeber: <i>Applicant:</i>	Université du Québec en Abitibi – Témiscamingue Chaire CRSNG Polytechnique-UQAT 445 boul. De l'Université Rouyn-Noranda (Québec), J9X 5E4, Canada	
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	5	
Geschäftszeichen: <i>Reference No.:</i>	PTB 3.32-4041921	
Prüfzeichen: <i>Test mark:</i>	37 PTB 09	
Datum der Prüfung: <i>Date of test:</i>	2009-06-26	
Im Auftrag: <i>On behalf of PTB:</i>	Braunschweig, 2009-06-29	Bearbeiter: <i>Examiner:</i>
	Siegel <i>Seal</i>	
 Henning Wolf		Annette Weber
<p><small>Prüfberichte ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Prüfbericht darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Test Reports without signature and seal are not valid. This Test Report may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.</small></p>		

Fiche technique sur les caractéristiques du fluide NNTF1 (équations de comportement et courbe d'écoulement de référence)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 2 zum Prüfbericht vom 2009-06-29, Prüfzeichen: 37 PTB 09
Page 2 of the Test Report dated 2009-06-29, test mark: 37 PTB 09

Ergebnis der Prüfung:

Die Untersuchungen wurden mit Rotationsviskosimetern durchgeführt, die nach DIN 53019-2 kalibriert sind. Alle Angaben beziehen sich auf den stationären Gleichgewichtszustand.

Im Schergeschwindigkeitsbereich $1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 10 \text{ s}^{-1}$ wird die Fließkurve durch ein Bingham- Fließgesetz

$$\tau = 10,7 \text{ Pa} + 0,053 \text{ Pa s } \dot{\gamma}$$

beschrieben. Für die durch Extrapolation auf $\dot{\gamma} = 0 \text{ s}^{-1}$ ermittelte Fließgrenze beträgt die Messunsicherheit ($k = 2$) 2,3 Pa.

Im Schergeschwindigkeitsbereich $10 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 600 \text{ s}^{-1}$ folgt die in der nicht-newtonschen Testflüssigkeit der Viskosität bei $20,0 \text{ °C}$ übertragenen Schubspannung τ in Pa der Zahlenwertgleichung von Ostwald-de-Waele ($\dot{\gamma}$ in s^{-1}) (siehe Fig. 1):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \text{ mit } K = 3,6419 \text{ und } n = 0,4882.$$

Die relativen Messunsicherheiten ($k = 2$) für diese Fließkurve $\tau(\dot{\gamma})$ sowie für die Beschreibung des Fließgesetzes durch die Umkehrfunktion $\dot{\gamma}(\tau)$ sind den untenstehenden Tabellen zu entnehmen.

Die Zeit vom Einbringen der Probe bis zum Ende der Messung sollte 20 Minuten nicht überschreiten, da flüchtige Bestandteile aus der Probe verdampfen können. Bei der Probe handelt es sich um eine Lösung von 6 Masseprozent eines Polystyrol-Polyisopren Copolymers in einem niedrigviskosen Kohlenwasserstoff-Öl. Der Temperatur-Viskositätskoeffizient nach DIN 53017:1993 bei 20 °C beträgt $0,01 \text{ K}^{-1}$.

Die Flasche ist nur zur Probenahme zu öffnen und anschließend sogleich zu verschließen. Die Flasche ist bei Temperaturen bis maximal 40 °C und dunkel aufzubewahren. Dieser Kalibrierschein gilt bis zu sechs Monate nach dem Kalibrierdatum der Probe, sofern die Flasche bis dahin nicht geöffnet wurde.

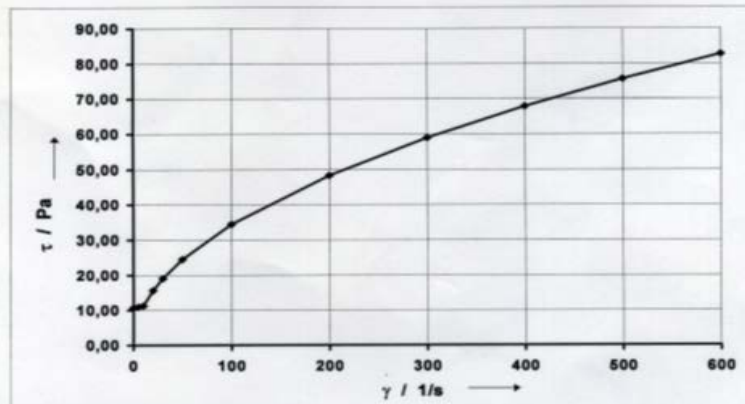


Fig. 1: Fließkurve (Flow curve)

Tableaux des valeurs de la contrainte et du taux de cisaillement avec les incertitudes sur chaque variable

Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 3 zum Prüfbericht vom 2009-06-29, Prüfzeichen: 37 PTB 09
Page 3 of test report of 2009-06-29, test mark: 37 PTB 09

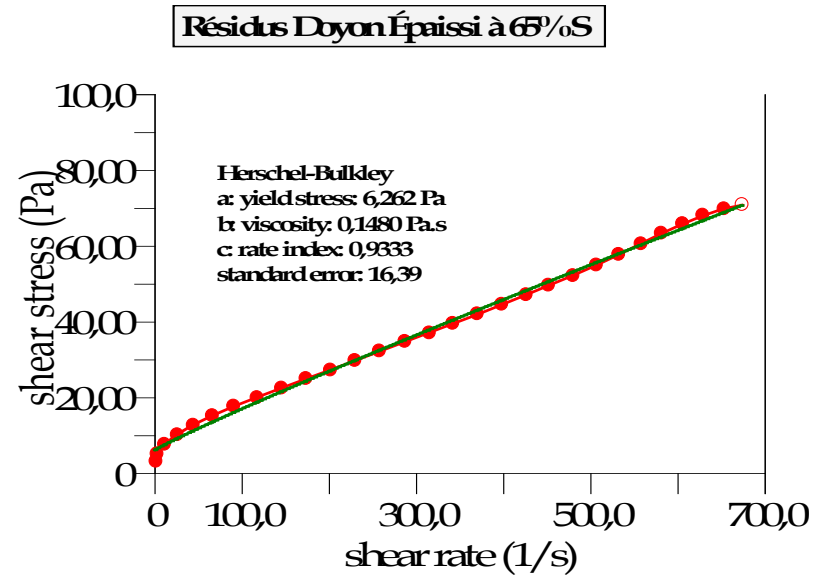
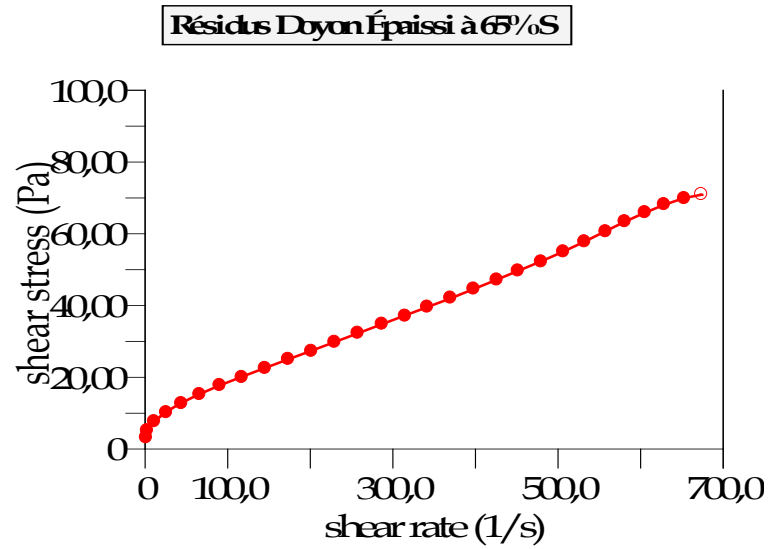
Schergeschwindigkeit	Schubspannung	rel. Messunsicherheit der Fließkurve
<i>Shear rate</i>	<i>Shear stress</i>	<i>Relative measurement uncertainty of the flow curve</i>
$\dot{\gamma}$ [1/s]	$\tau(\dot{\gamma})$ [Pa]	$\tau(\dot{\gamma})$ ($k = 2$) (%)
20	15,72	5,5
30	19,16	4,6
50	24,59	3,5
100	34,49	3,5
200	48,38	3,5
300	58,97	3,5
400	67,87	3,5
500	75,68	3,4
600	82,72	3,4

Schubspannung	Schergeschwindigkeit	rel. Messunsicherheit der Fließkurve
<i>Shear stress</i>	<i>Shear rate</i>	<i>Relative measurement uncertainty of the flow curve</i>
τ [Pa]	$\dot{\gamma}(\tau)$ [1/s]	$\dot{\gamma}(\tau)$ ($k = 2$) (%)
16	20,73	11,3
20	32,75	9,4
30	75,14	7,5
40	135,45	7,1
50	213,93	7,1
60	310,79	7,1
70	426,19	7,1
80	560,26	7,1
82	589,32	7,0

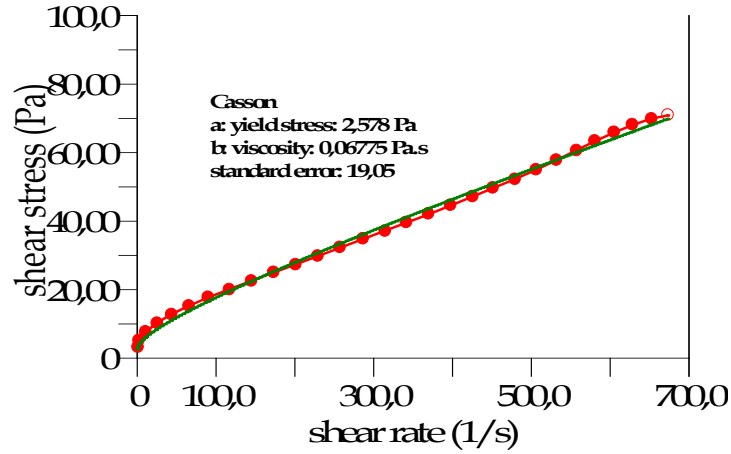
Annexe 3 : Feuilles de calcul des ingrédients des recettes de remblais Doyon aux pourcentages solides de 70, 72,5 et 75 %

Annexe 4 : Ajustement des courbes d'écoulement et de viscosité de l'ensemble des recettes étudiées

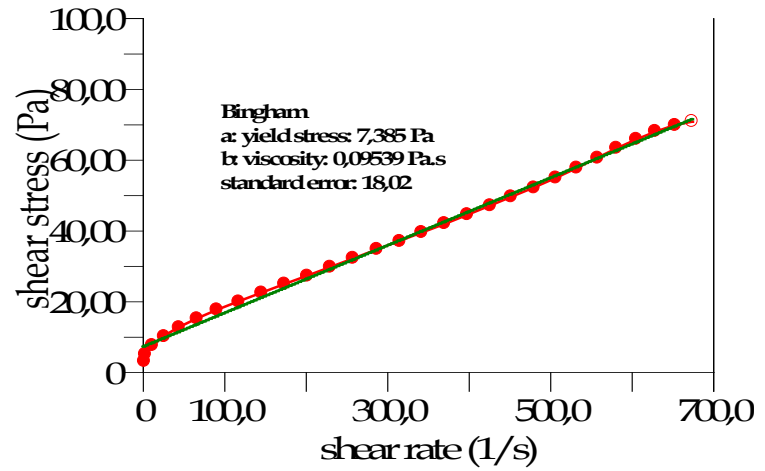
Ajustement des courbes d'écoulement et de viscosité des recettes à base de résidus Doyon



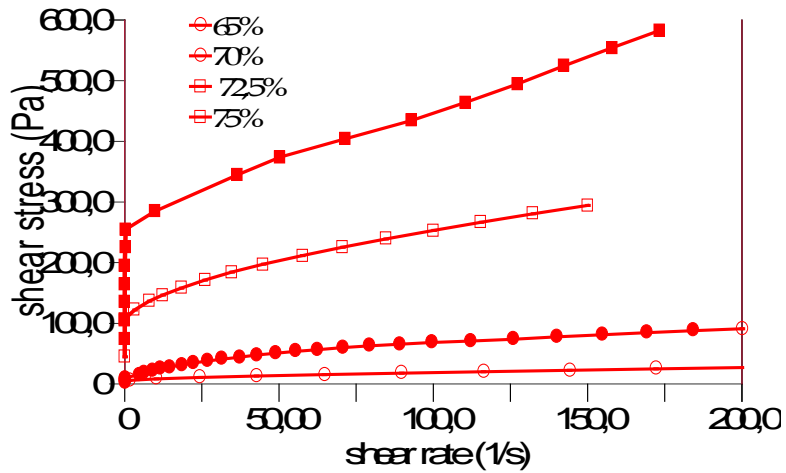
Résidus Deyon Épaissi à 65% S



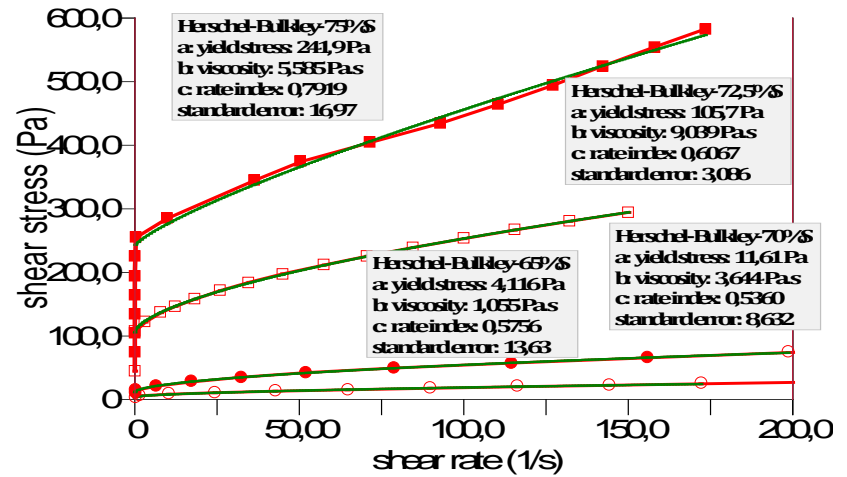
Résidus Deyon Épaissi à 65% S



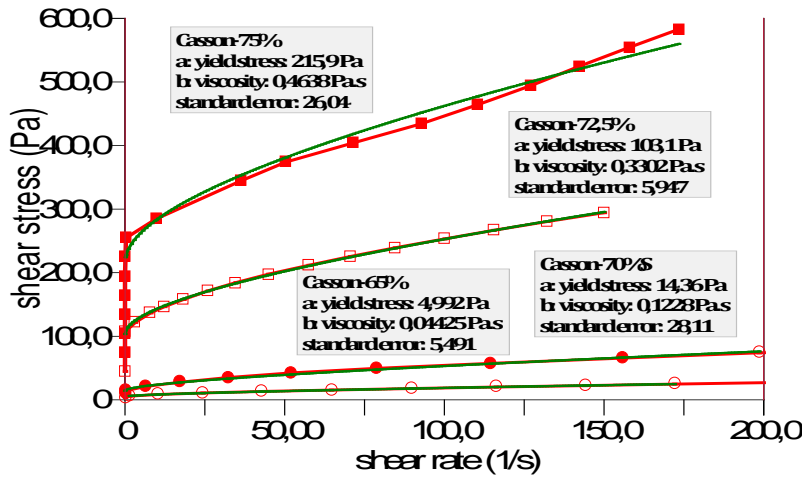
Résidu Deyon épaissi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



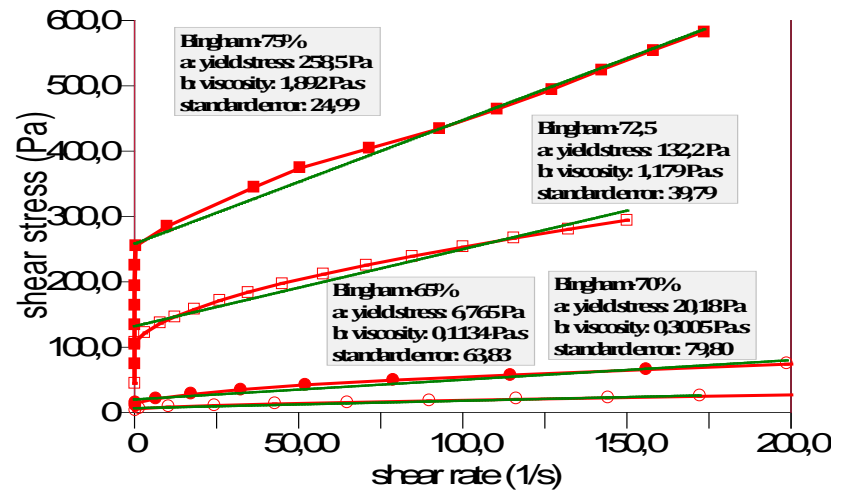
Résidu Deyon épaissi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



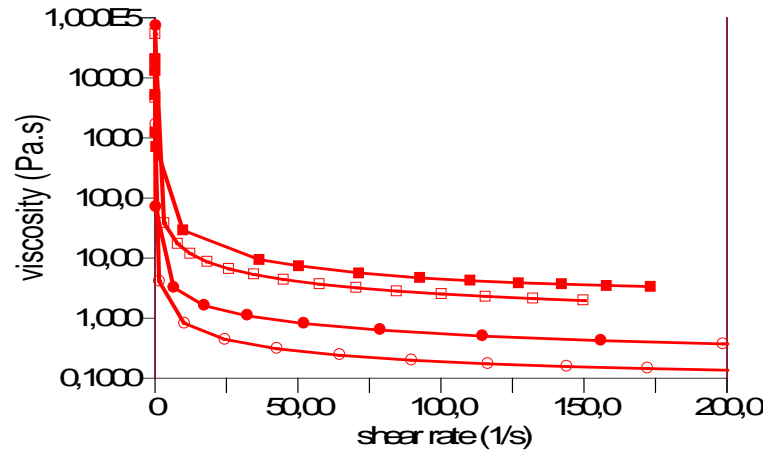
Résidu Dyon épaisi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



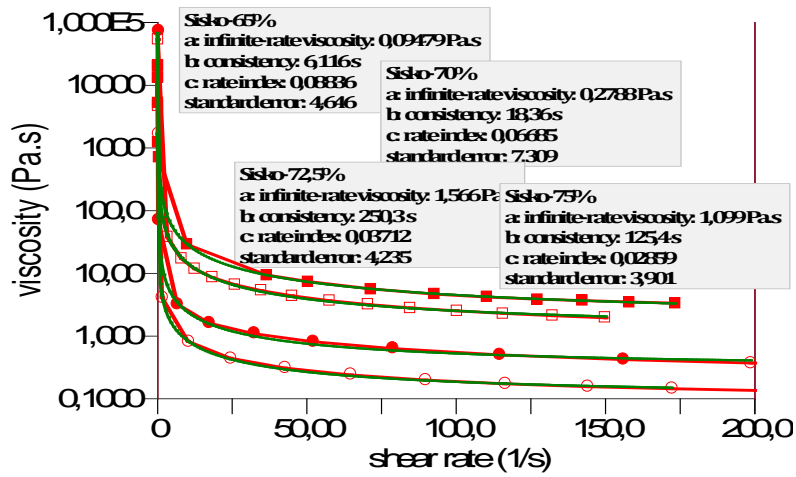
Résidu Dyon épaisi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



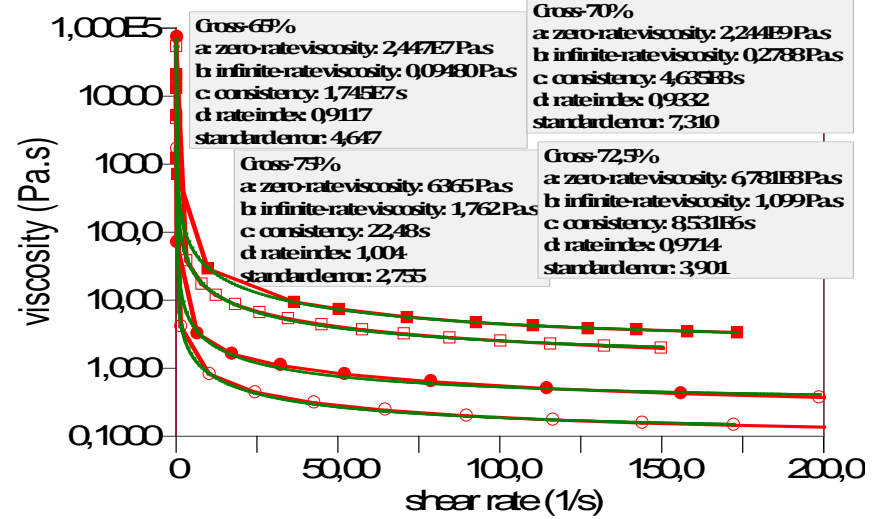
Résidu Dyon épaisi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



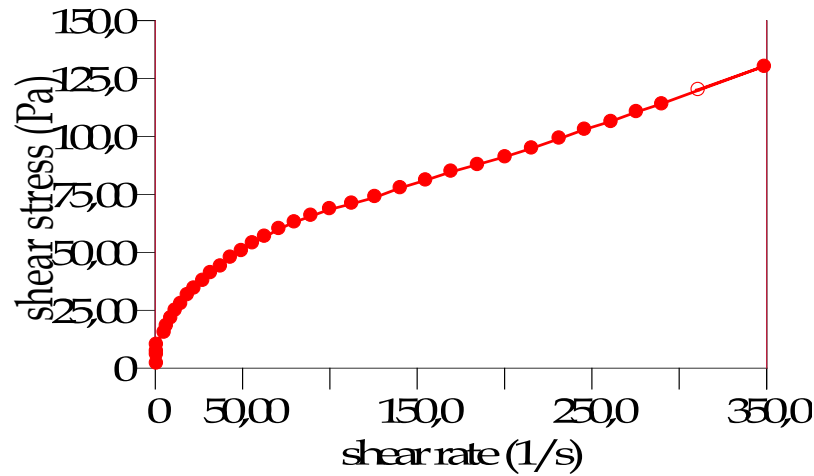
Résidu Dyon épaissi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



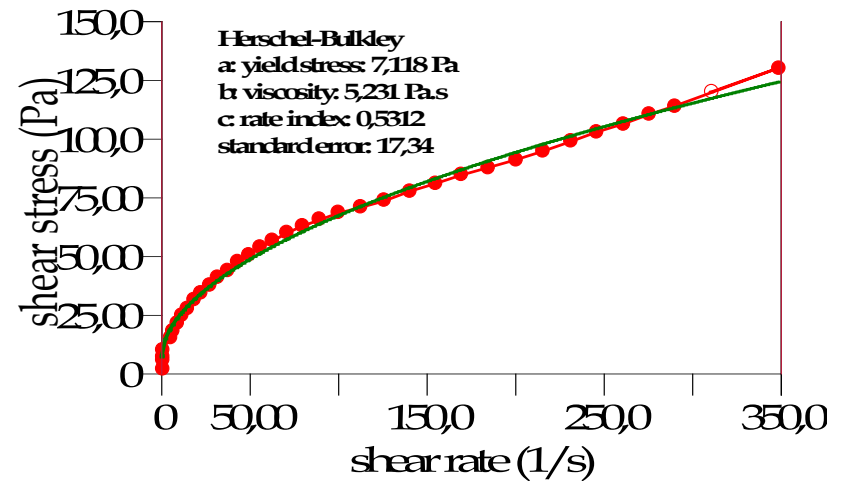
Résidu Dyon épaissi à 65%, 70%, 72,5% et 75% S



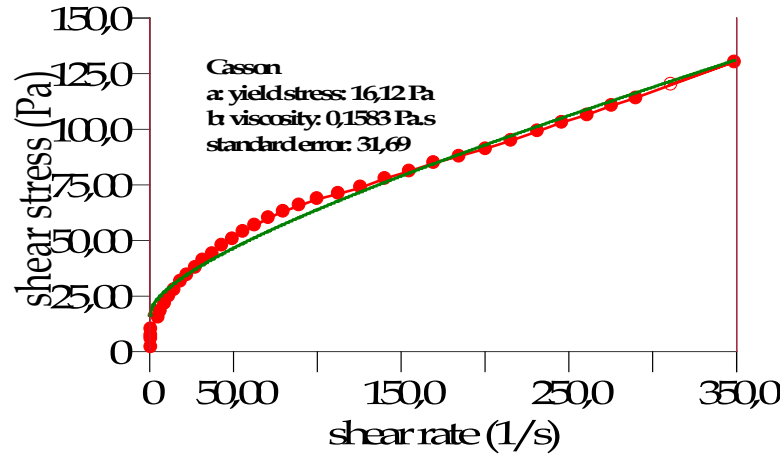
Résidu Dyon Épaissi à 70% S



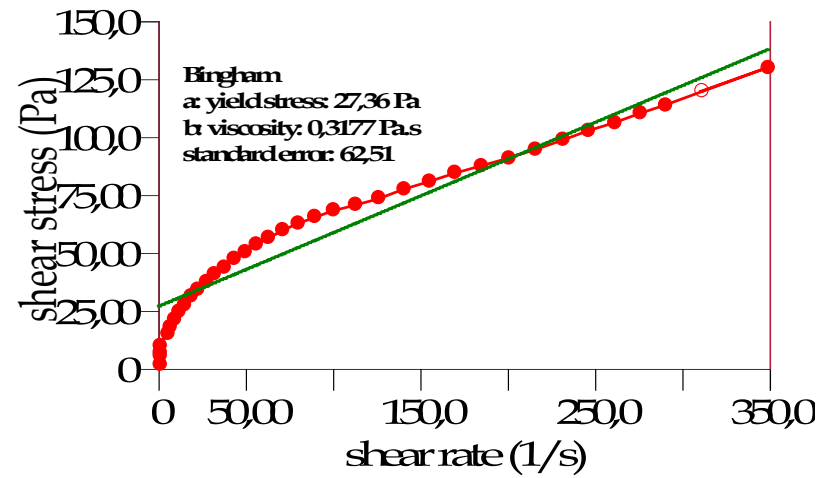
Résidu Dyon Épaissi à 70% S



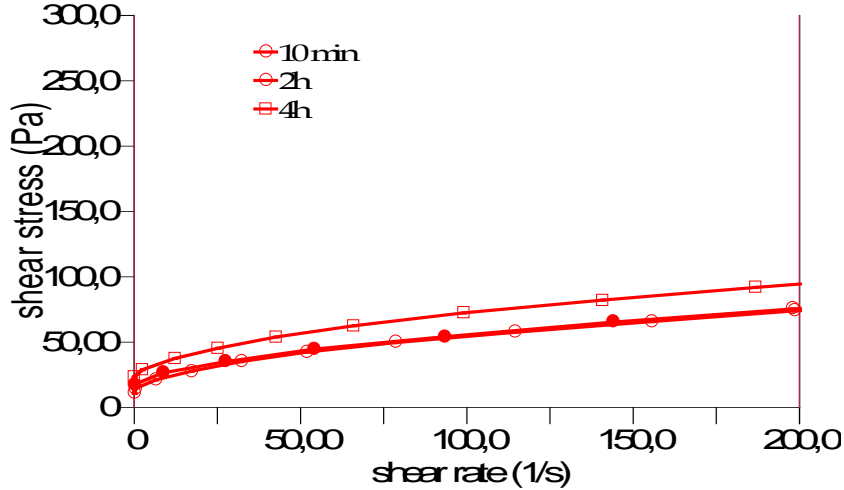
Résidu Doyon Épaissi à 70%S



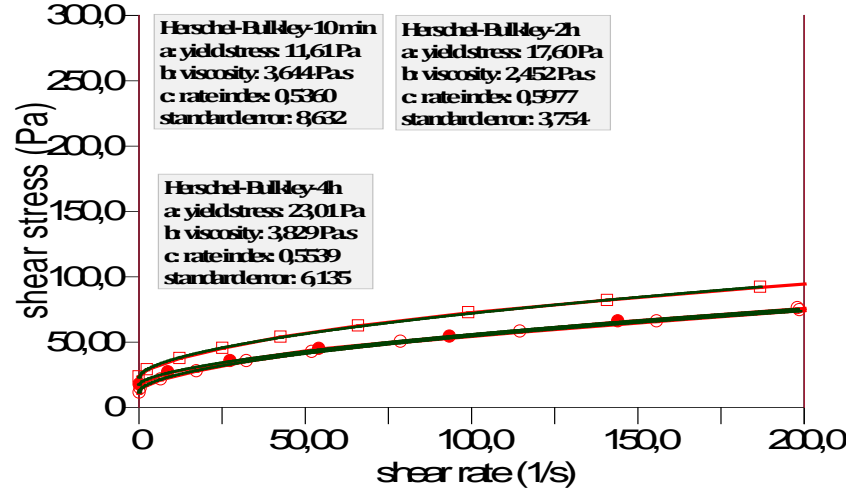
Résidu Doyon Épaissi à 70%S



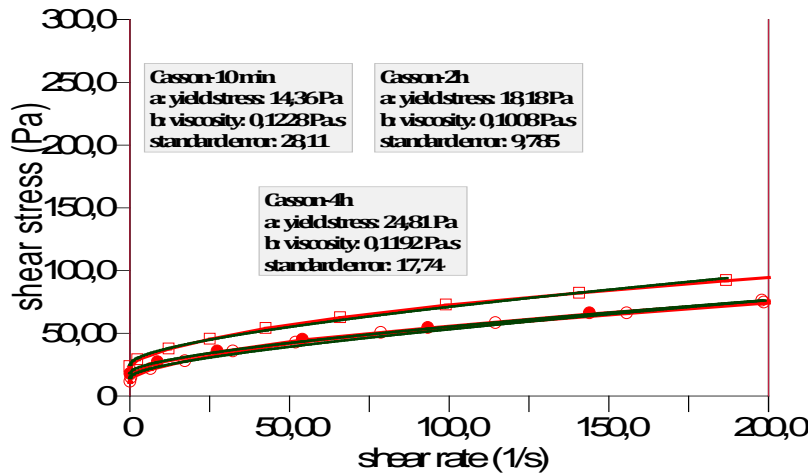
Remblai Doyon 70%S @ 0% diant-10 min, 2h et 4h



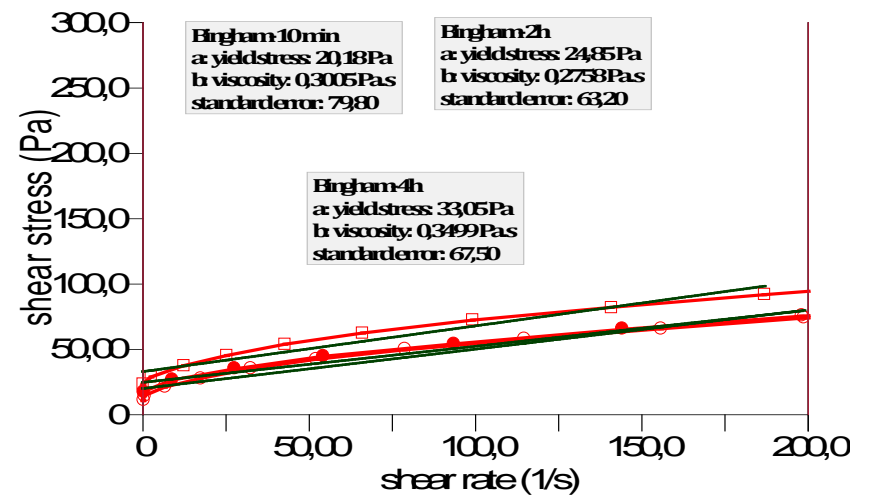
Remblai Doyon 70%S @ 0% diant-10 min, 2h et 4h



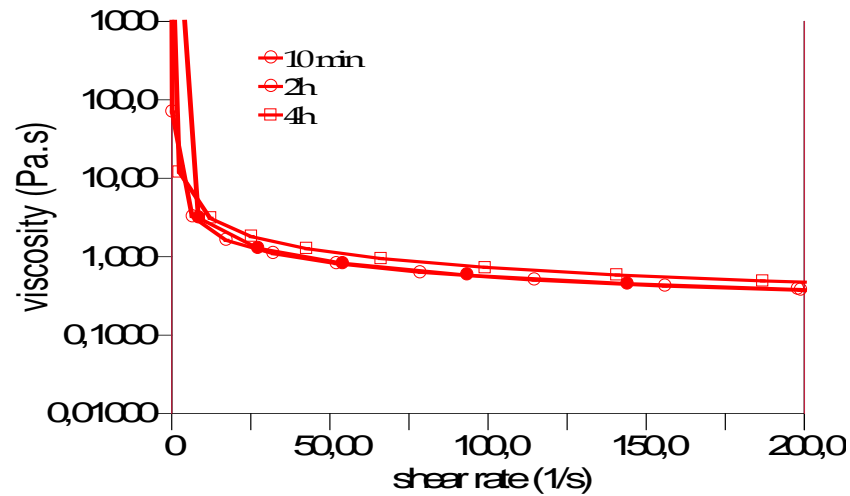
Renblai Dyon70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



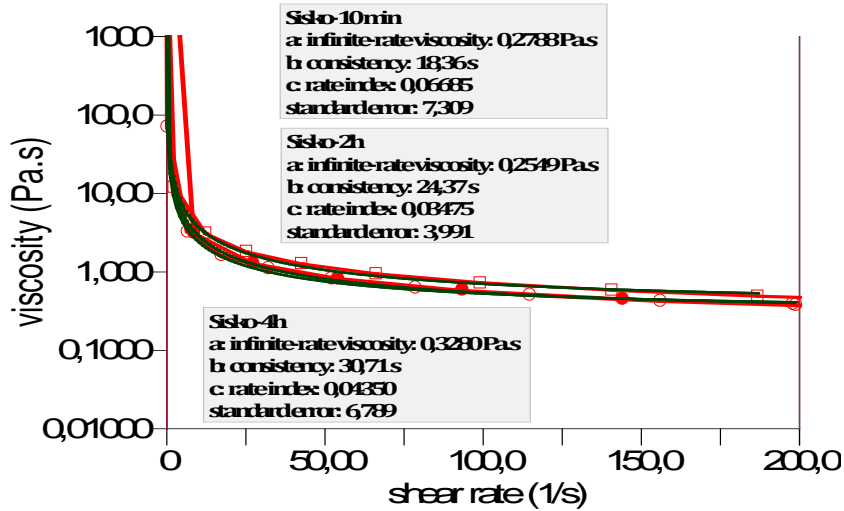
Renblai Dyon70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



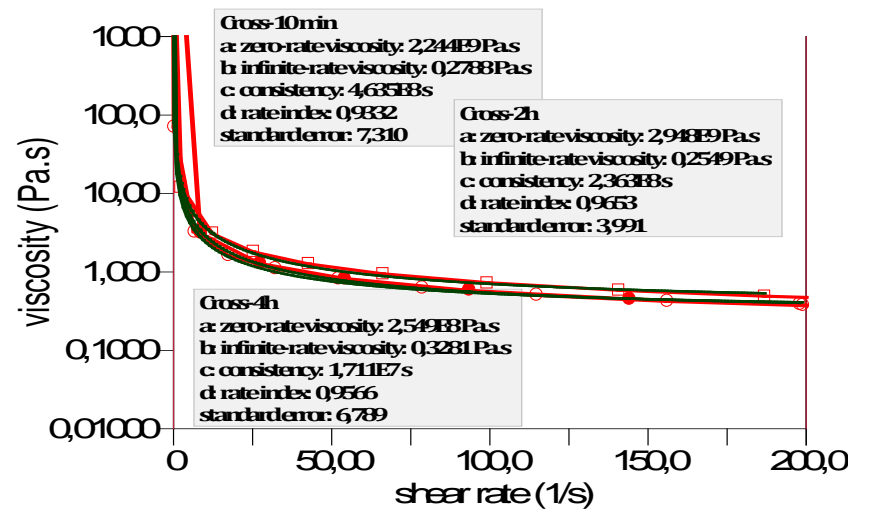
Renblai Dyon70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



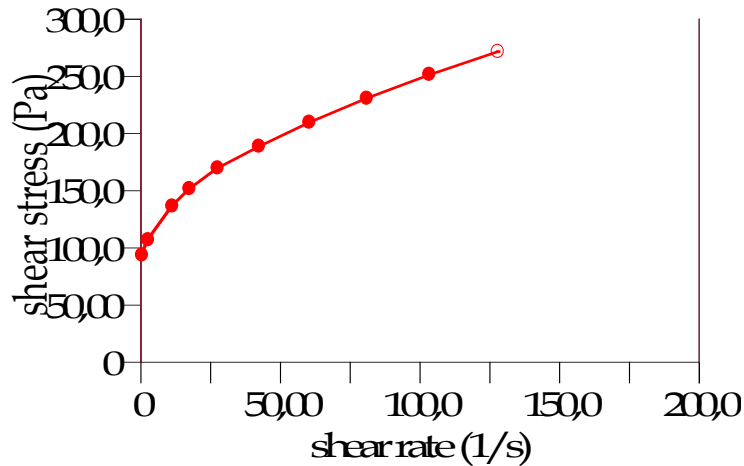
Renblai Dyon 70%/S@0%/diart-10min, 2het 4h



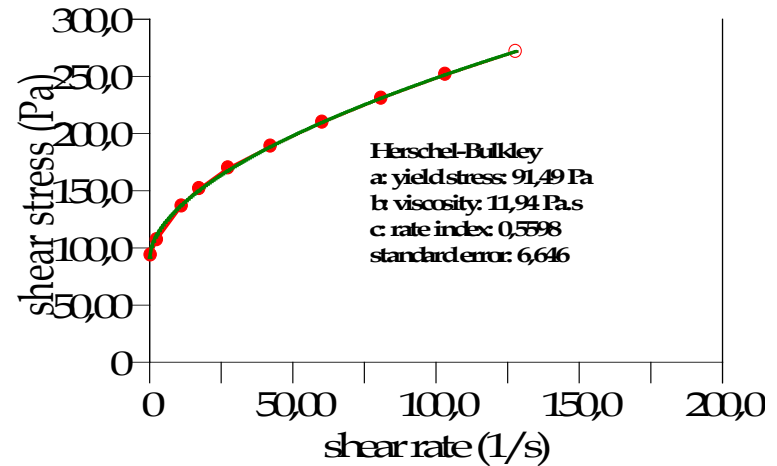
Renblai Dyon 70%/S@0%/diart-10min, 2het 4h



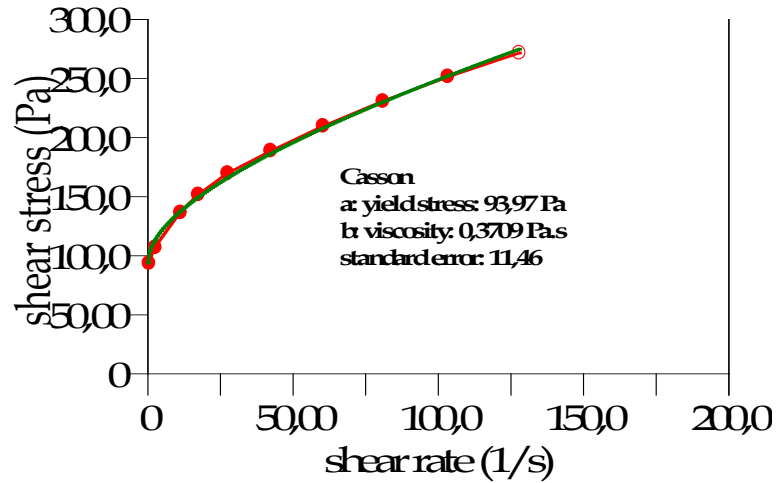
Résidu Dyon Épais à 72,5%/S



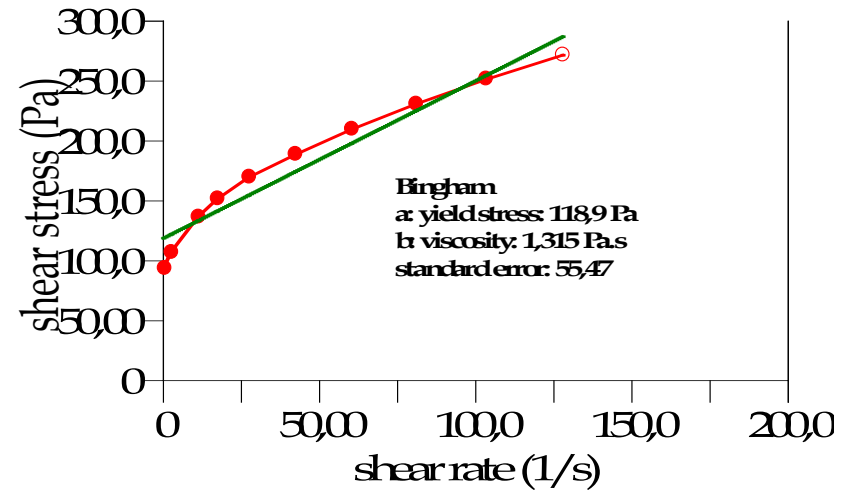
Résidu Dyon Épais à 72,5%/S



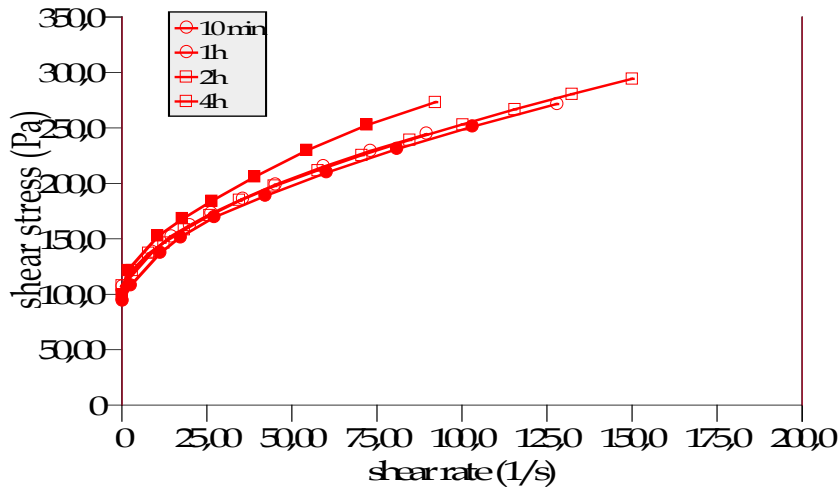
Résidu Doyon Épaissi à 72,5% S



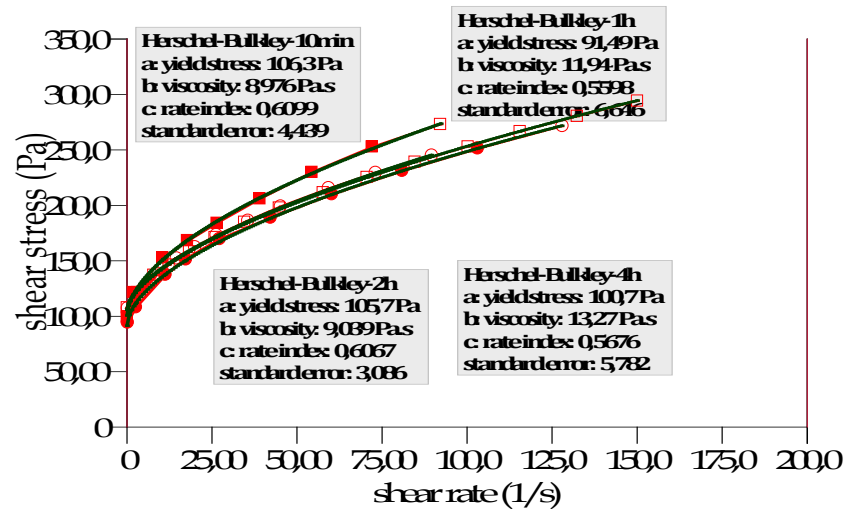
Résidu Doyon Épaissi à 72,5% S



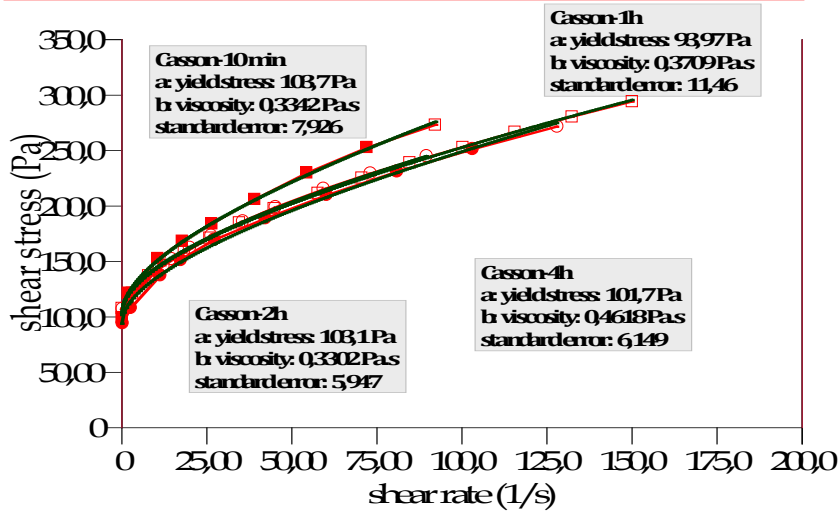
Résidu Doyon Épaissi 72,5% S @ 0% diant-10 min, 1h, 2h, et 4h



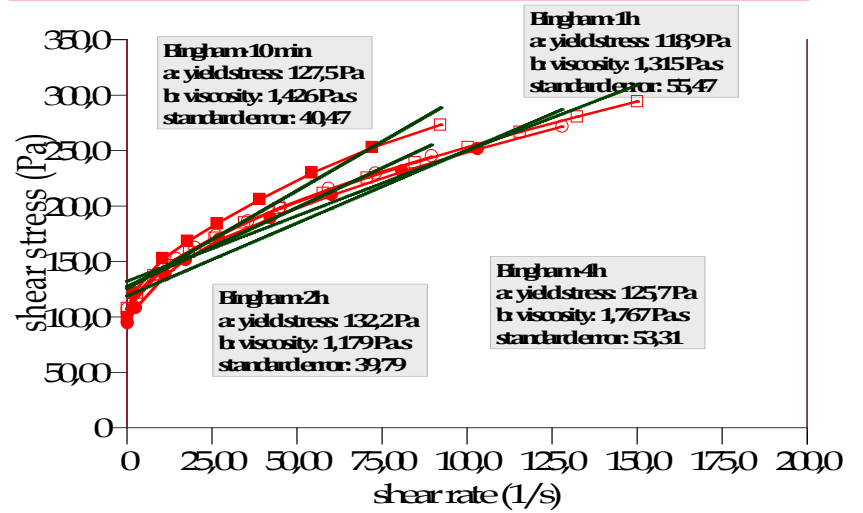
Résidu Doyon Épaissi 72,5% S @ 0% diant-10 min, 1h, 2h, et 4h



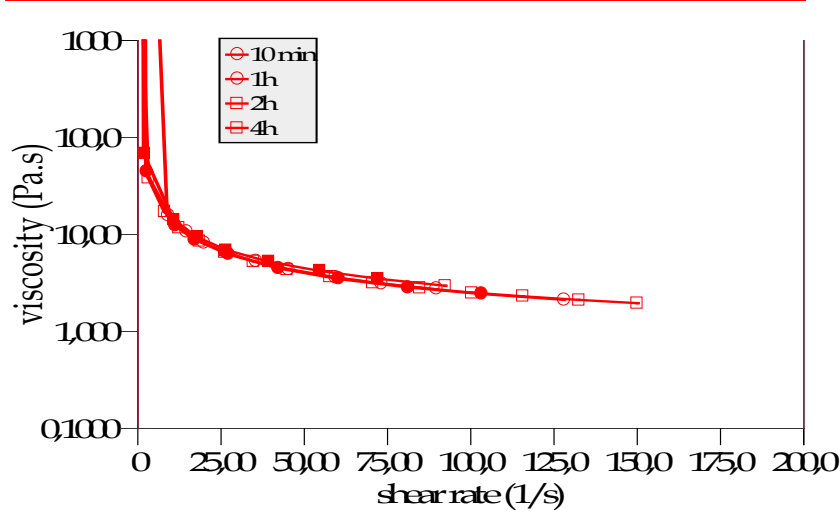
Résidu Dyon Épaissi 72,5%/S@0°/diant-10 min, 1h, 2h, et 4h



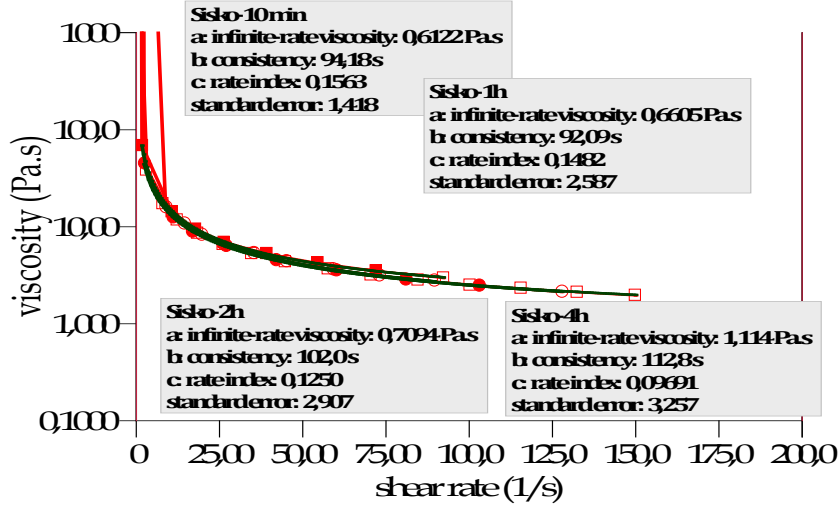
Résidu Dyon Épaissi 72,5%/S@0°/diant-10 min, 1h, 2h, et 4h



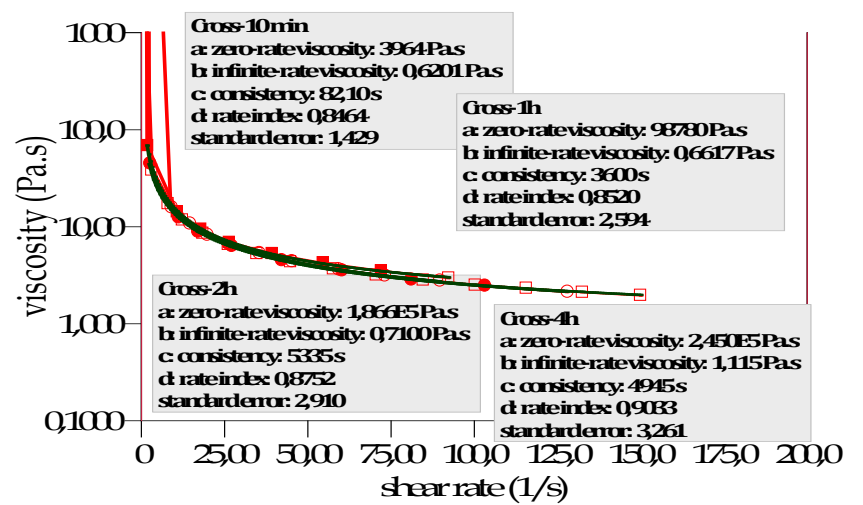
Résidu Dyon Épaissi 72,5%/S@0°/diant-10 min, 1h, 2h, et 4h



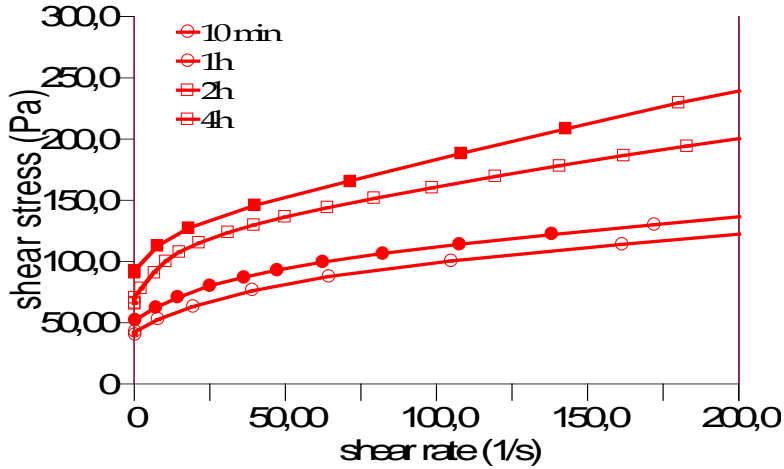
Résidu Dyon Épaissi 72,5%/S@0%/liant-10min, 1h, 2h, et 4h



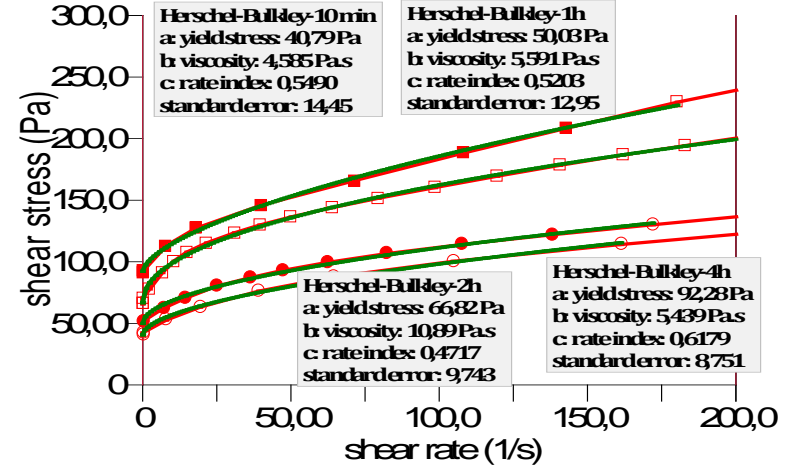
Résidu Dyon Épaissi 72,5%/S@0%/liant-10min, 1h, 2h, et 4h



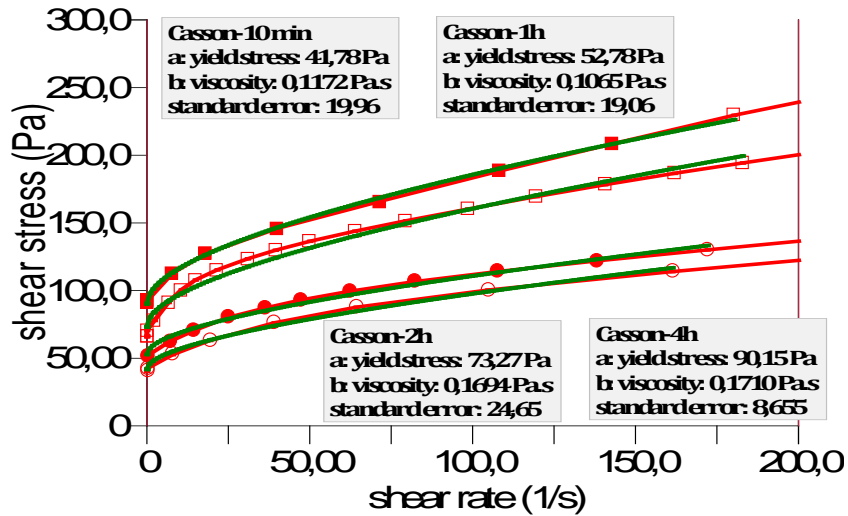
Remblai Dyon 70%/S@2%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



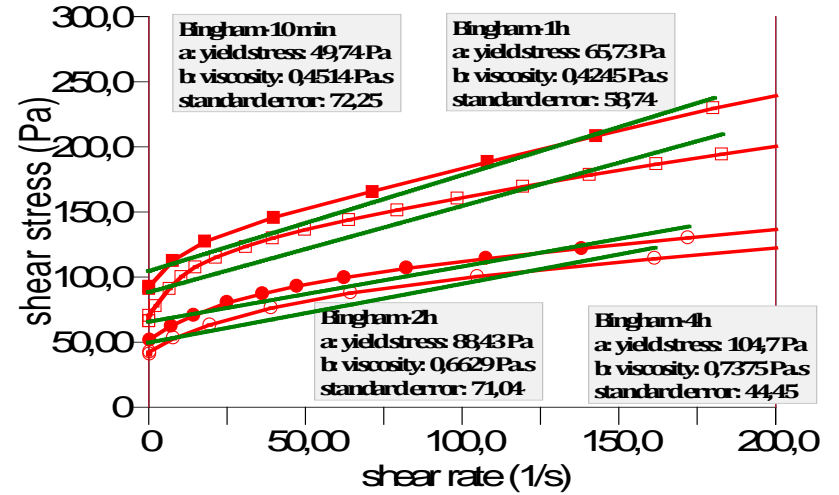
Remblai Dyon 70%/S@2%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



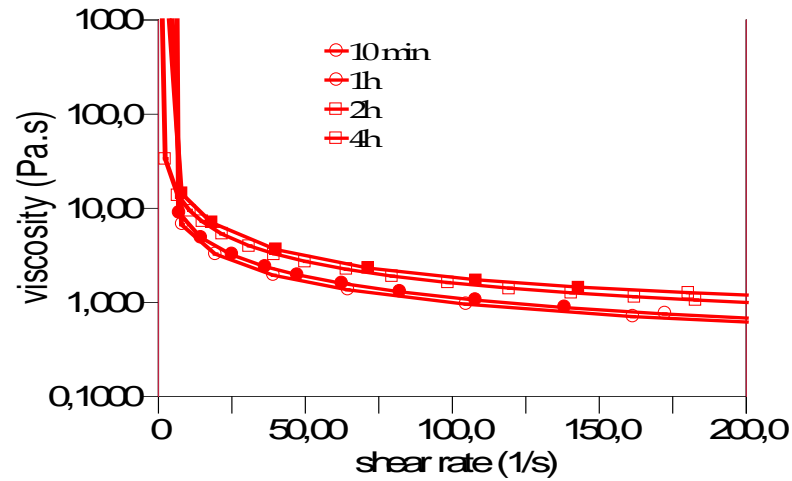
Remblai Doyon 70%/S@2%CP-10min, 1h, 2h et 4h



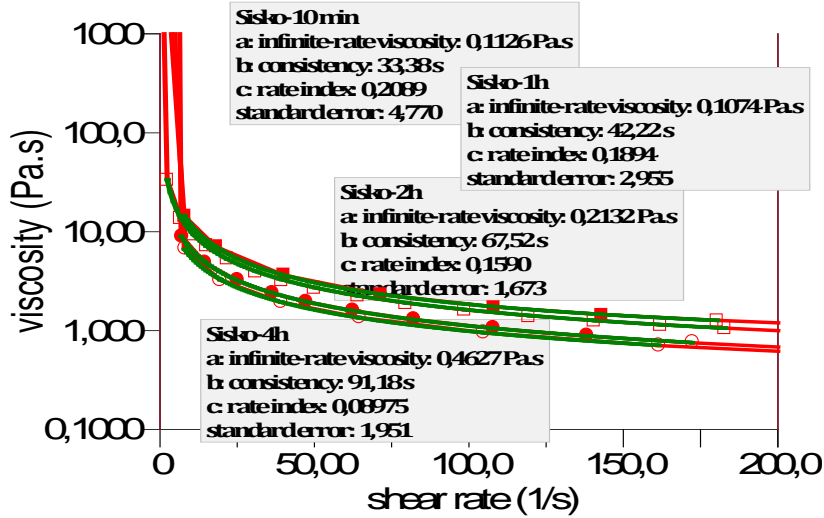
Remblai Doyon 70%/S@2%CP-10min, 1h, 2h et 4h



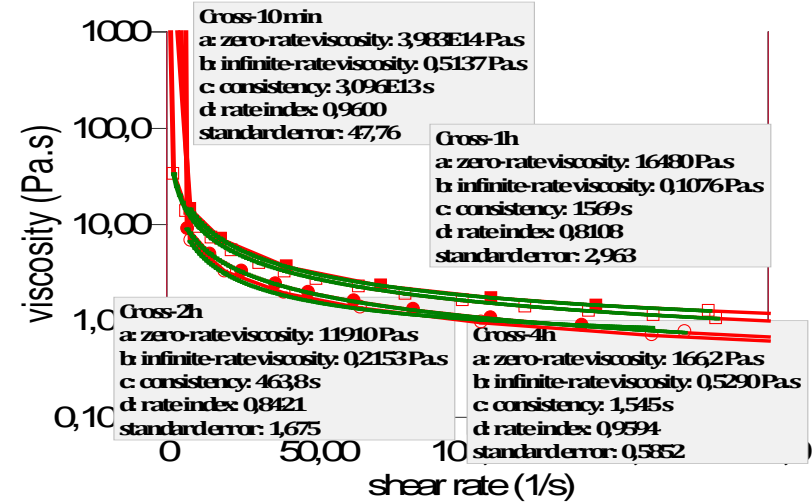
Remblai Doyon 70%/S@2%CP-10min, 1h, 2h et 4h



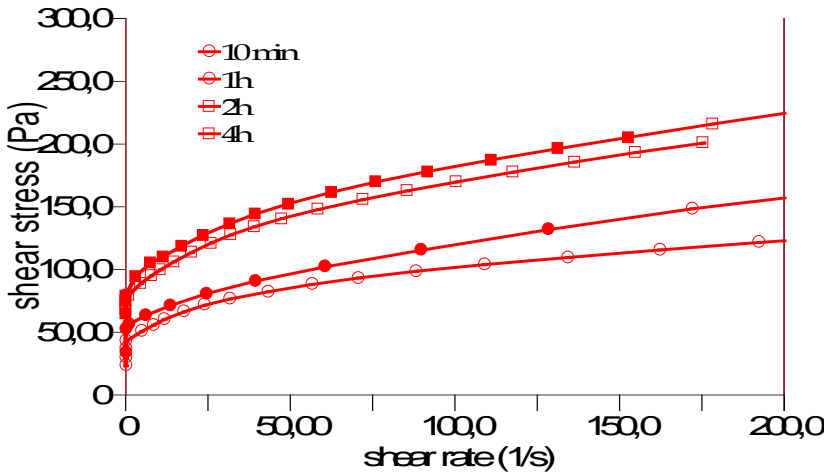
Remblai Dyon 70/S@2%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



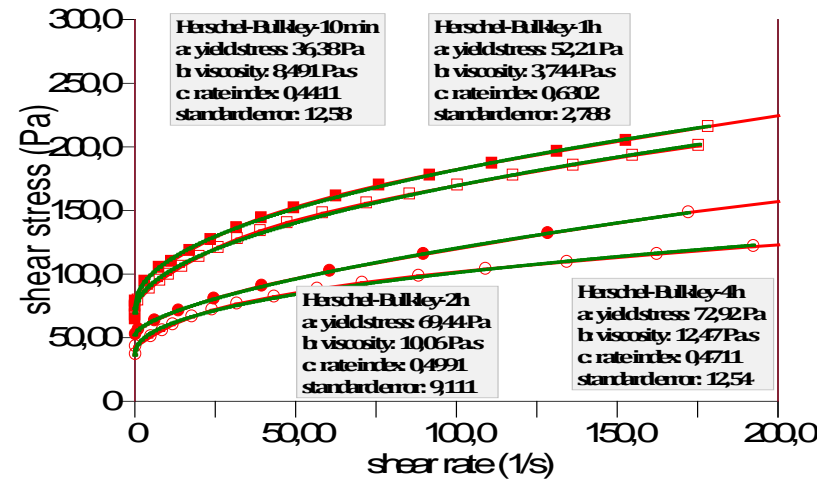
Remblai Dyon 70/S@2%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



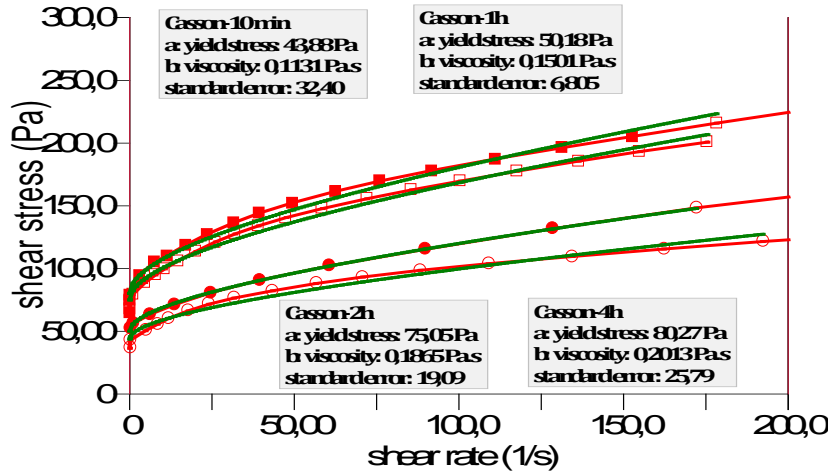
Remblai Dyon 70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



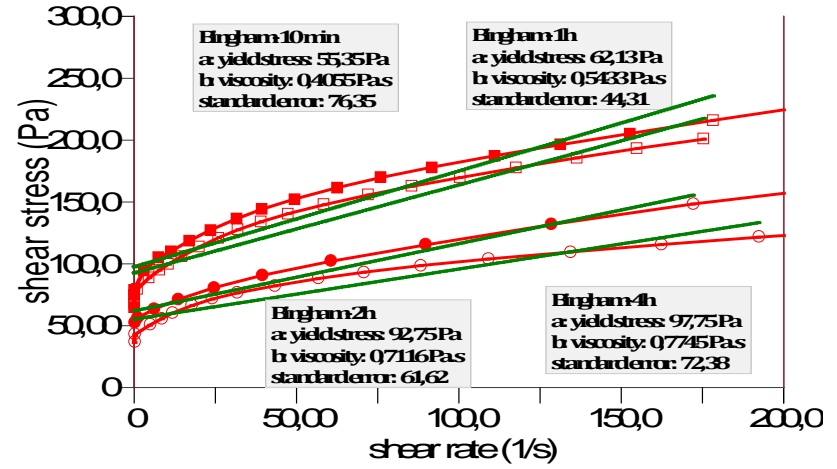
Remblai Dyon 70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



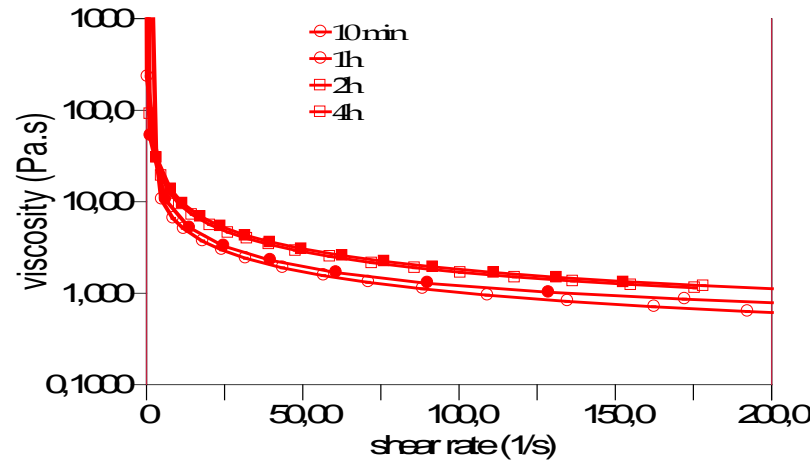
Renblai Dyon70/S@2%CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



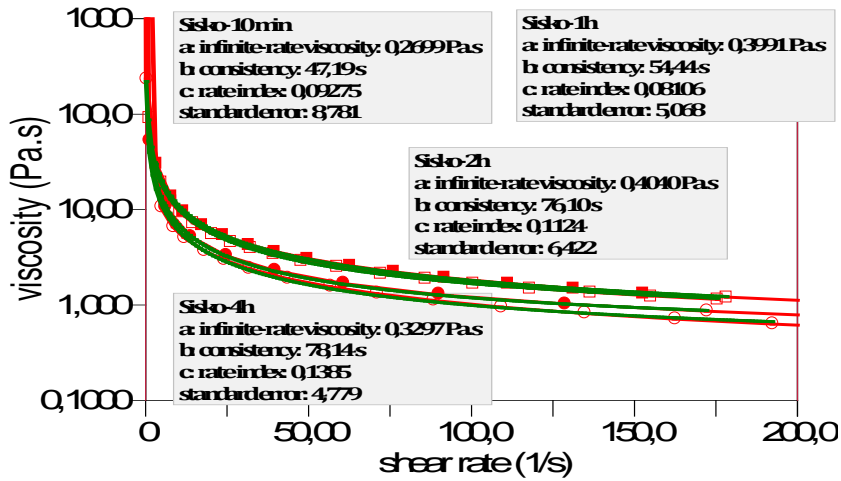
Renblai Dyon70/S@2%CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



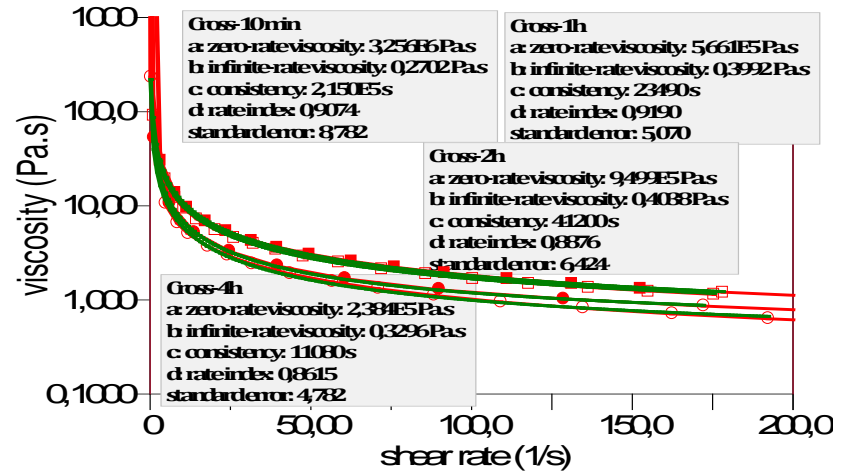
Renblai Dyon70/S@2%CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



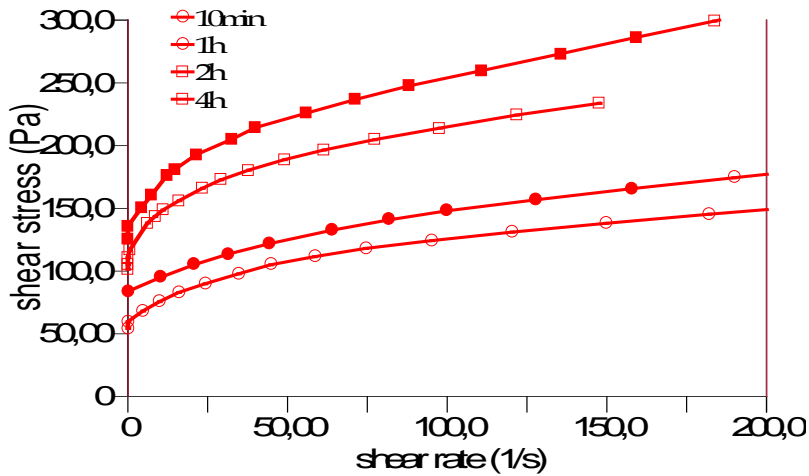
Renblai Dyon70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



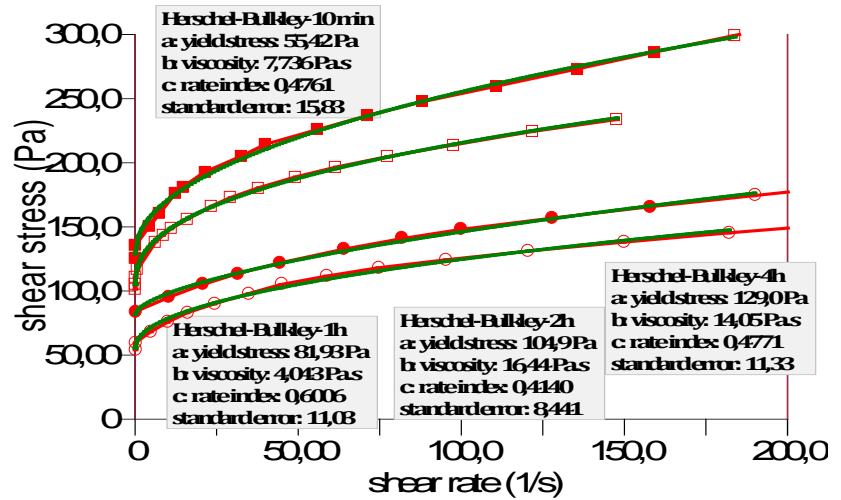
Renblai Dyon70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



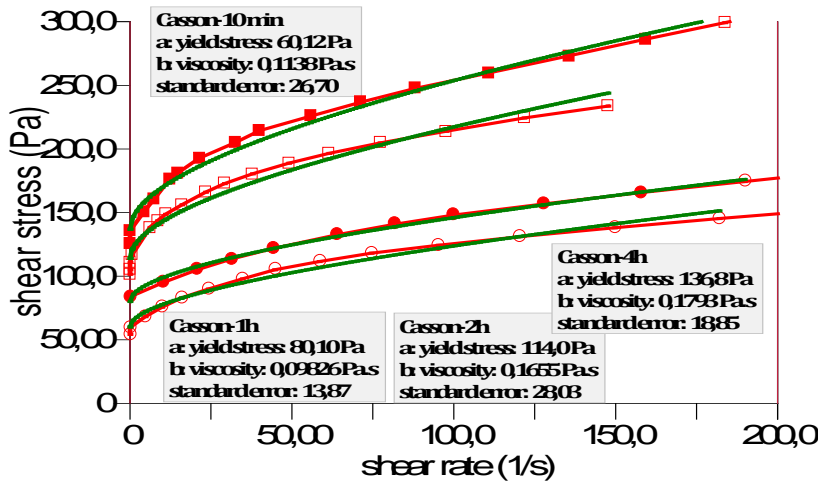
Renblai Dyon70/S@4,5%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



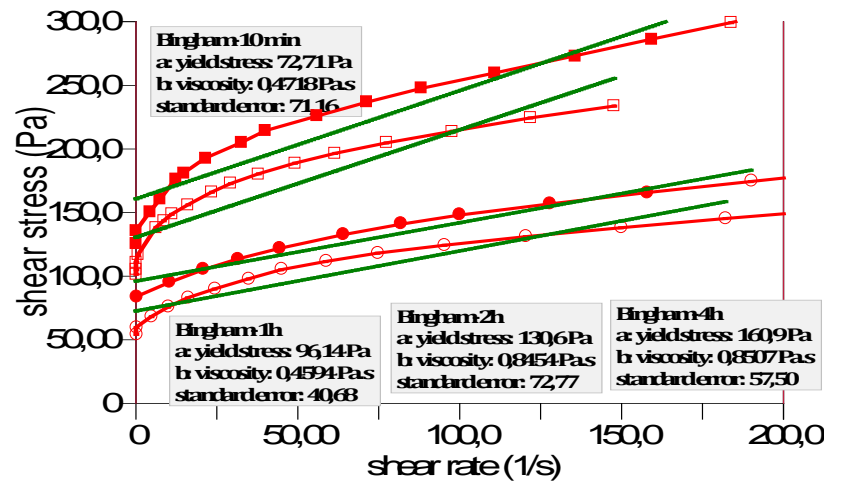
Renblai Dyon70/S@4,5%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



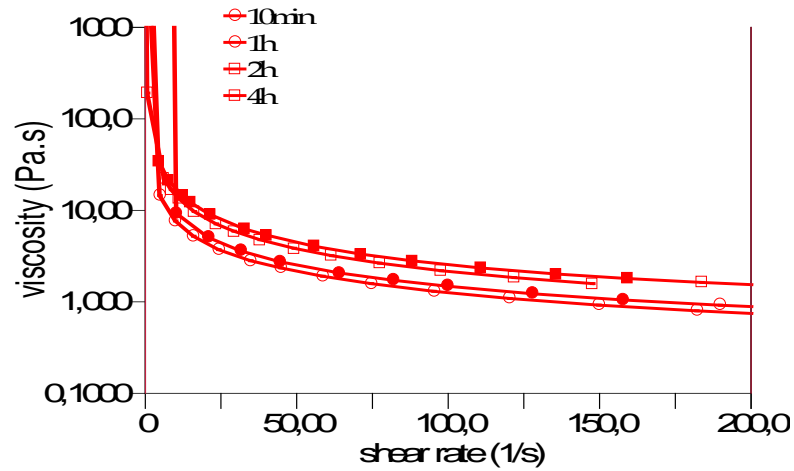
Renblai Dyon70/S@45%CP-10min, 1h, 2h et 4h



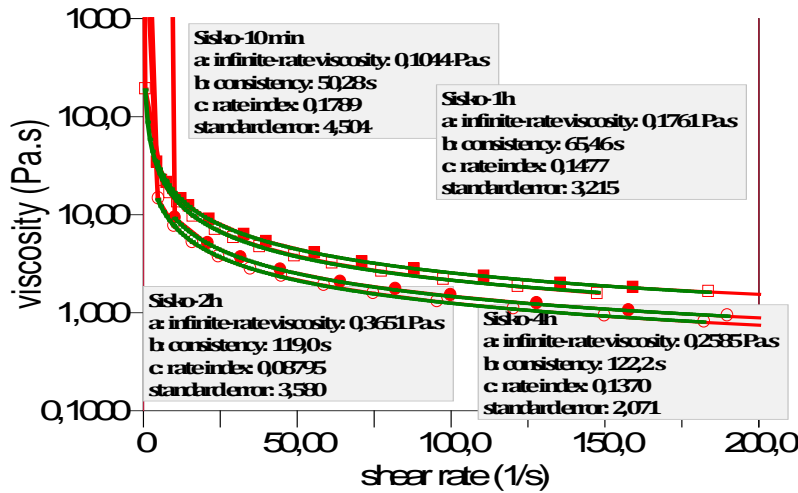
Renblai Dyon70/S@45%CP-10min, 1h, 2h et 4h



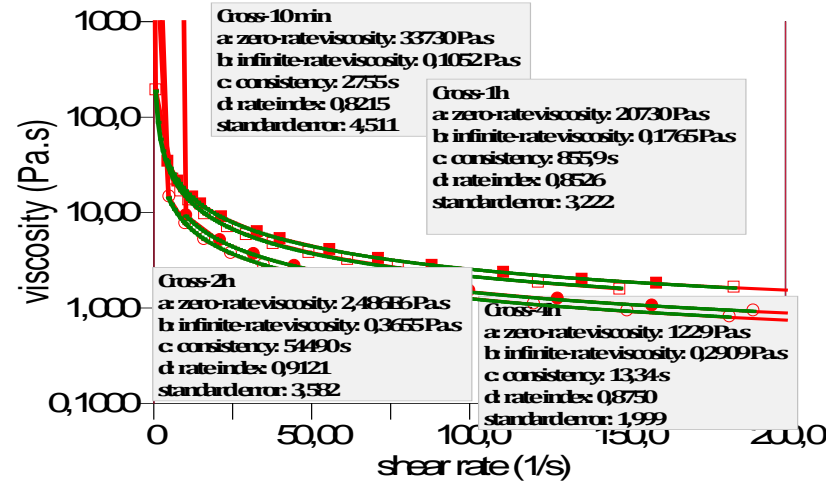
Renblai Dyon70/S@45%CP-10min, 1h, 2h et 4h



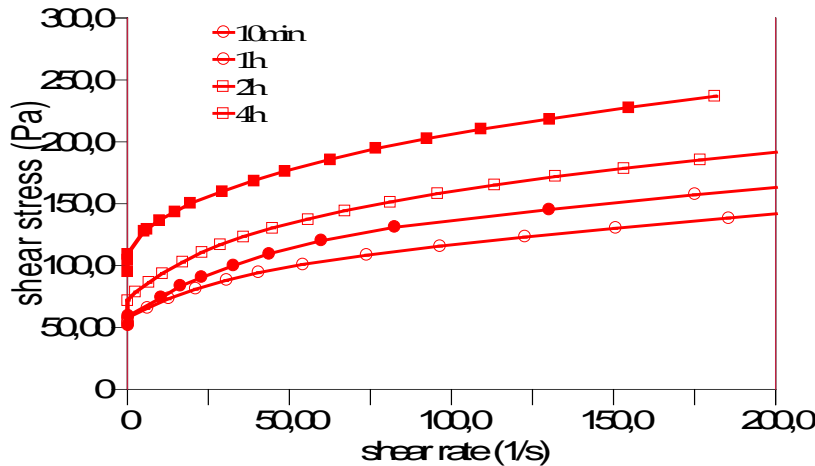
Renblai Dyon70/S@45%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



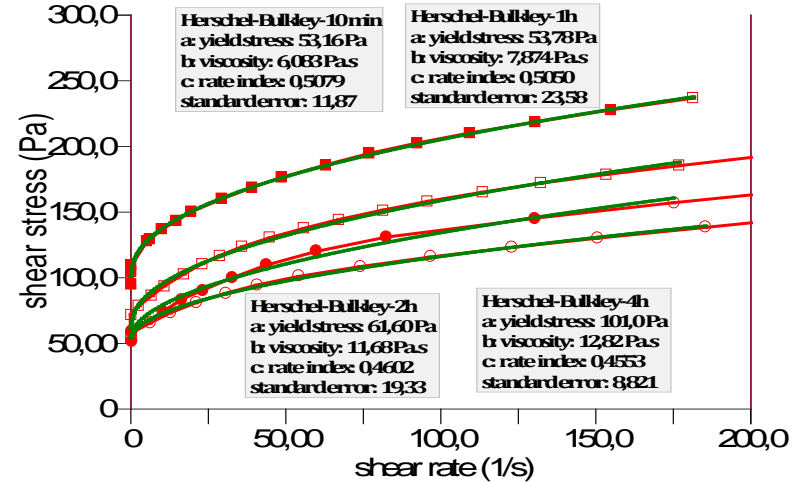
Renblai Dyon70/S@45%/CP-10min, 1h, 2h et 4h



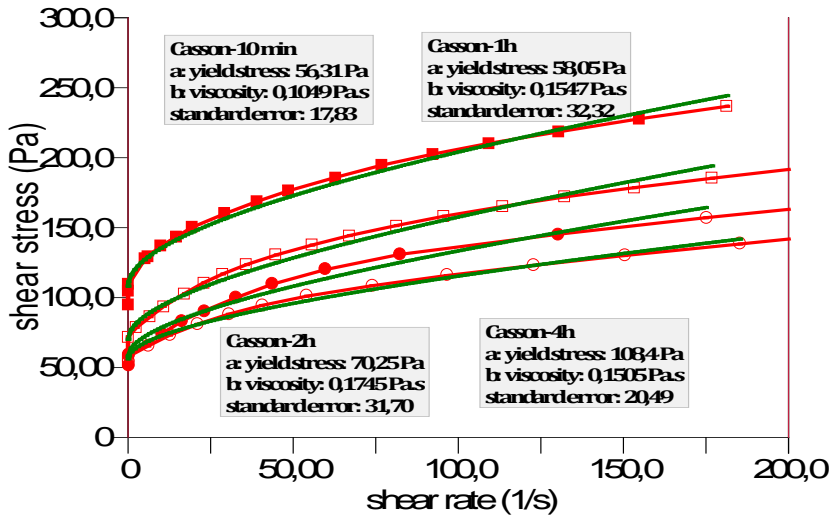
Renblai Dyon70/S@45%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



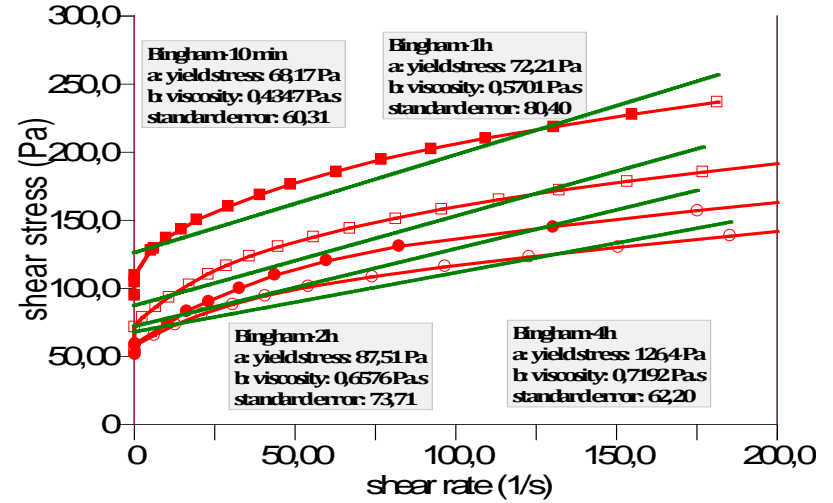
Renblai Dyon70/S@45%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



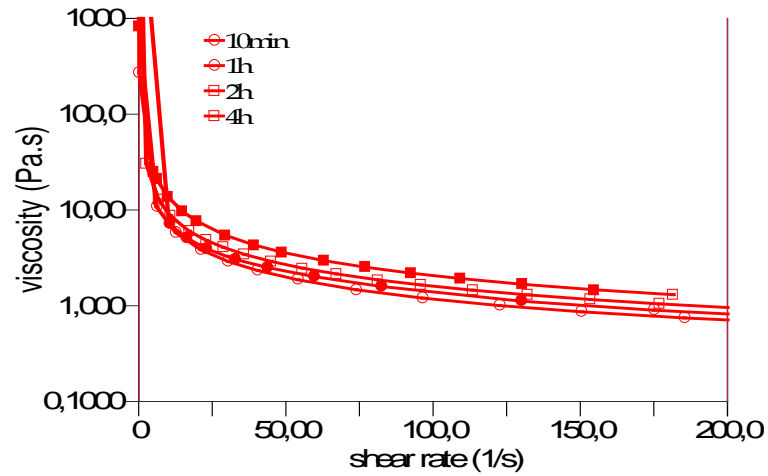
Renblai Dyon 70% δ @4,5%CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



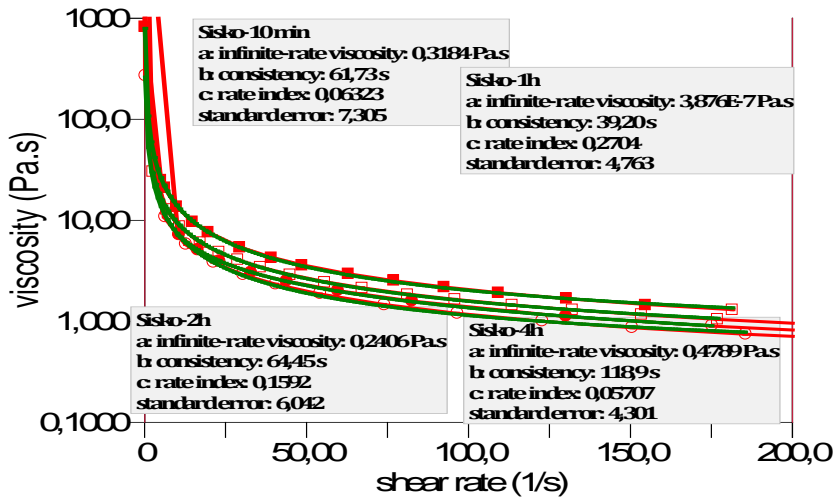
Renblai Dyon 70% δ @4,5%CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



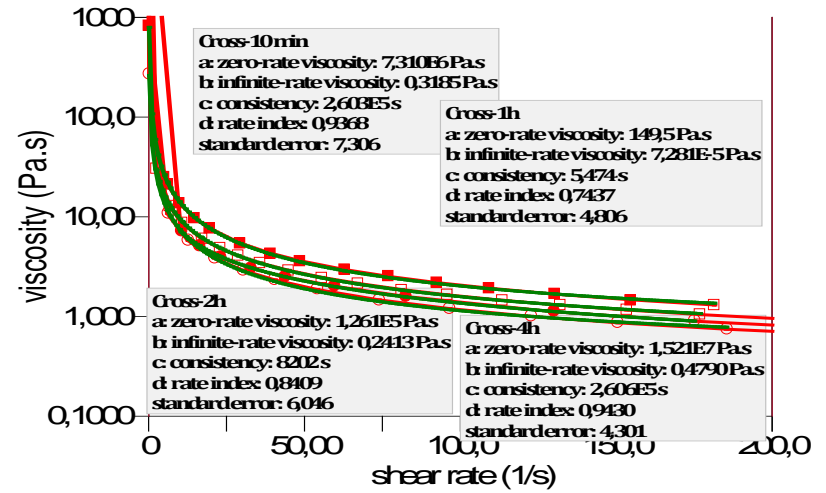
Renblai Dyon 70% δ @4,5%CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



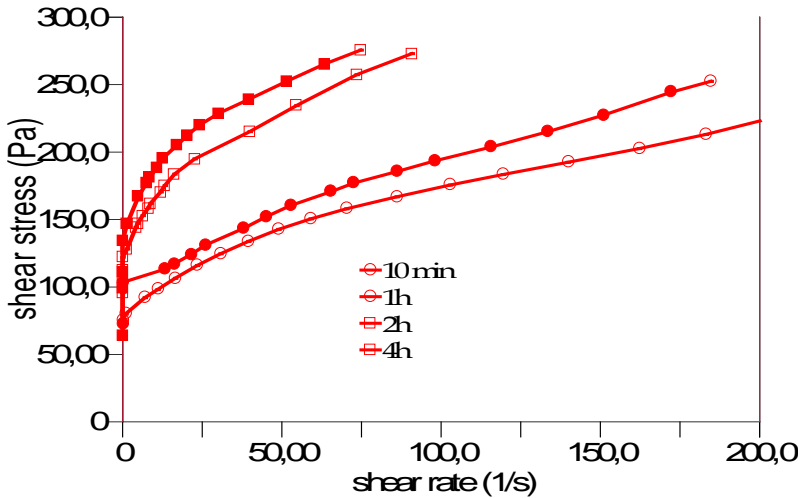
Renblai Dyon 70/S @ 4,5% CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



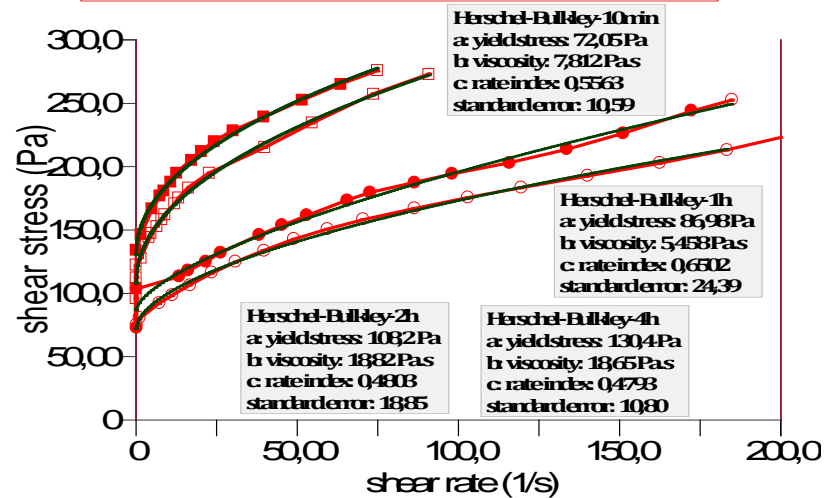
Renblai Dyon 70/S @ 4,5% CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h

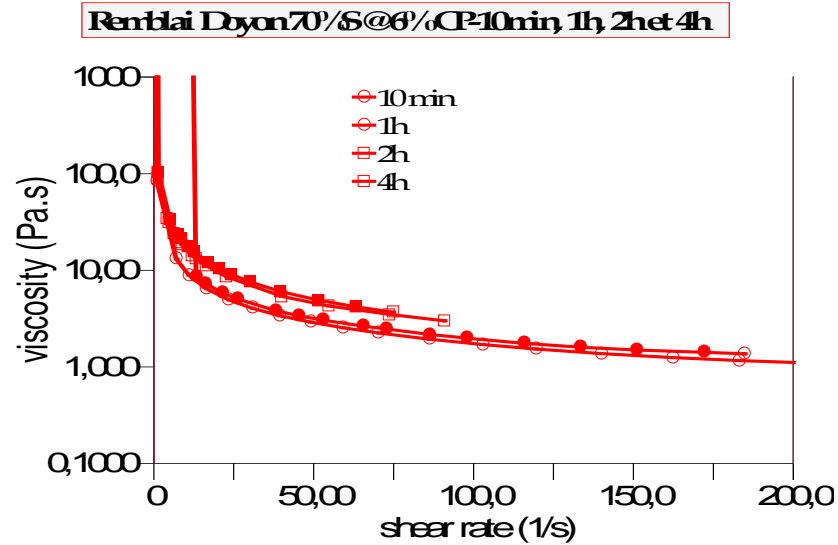
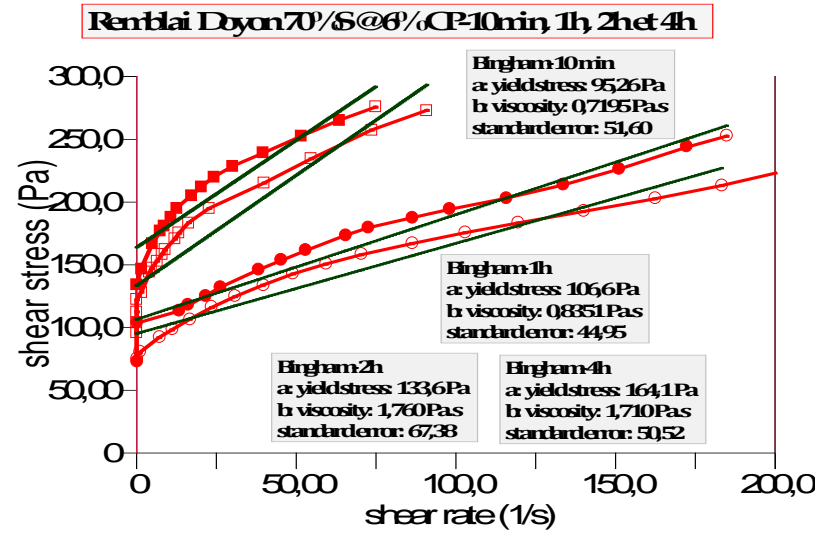
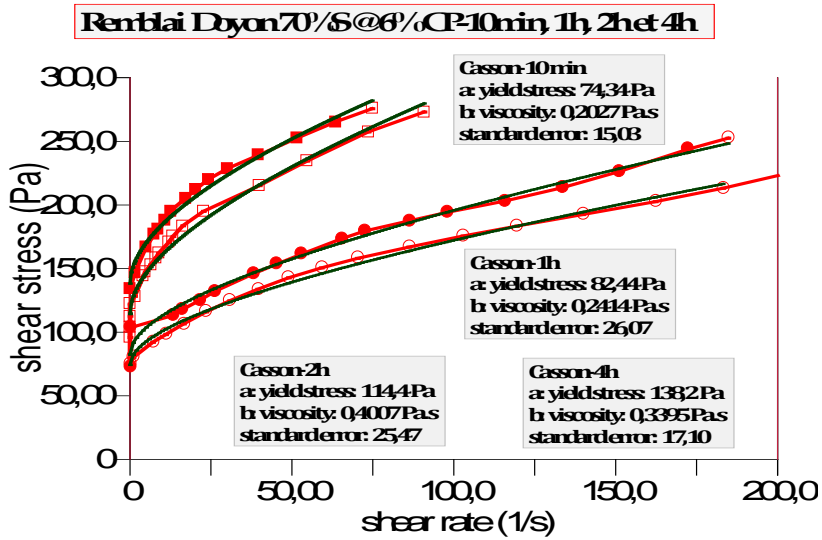


Renblai Dyon 70/S @ 6% CP-10min, 1h, 2h et 4h

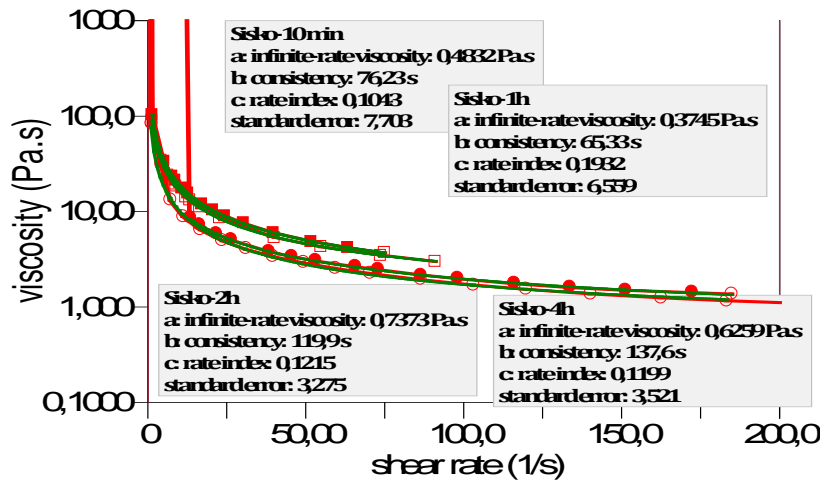


Renblai Dyon 70/S @ 6% CP-10min, 1h, 2h et 4h

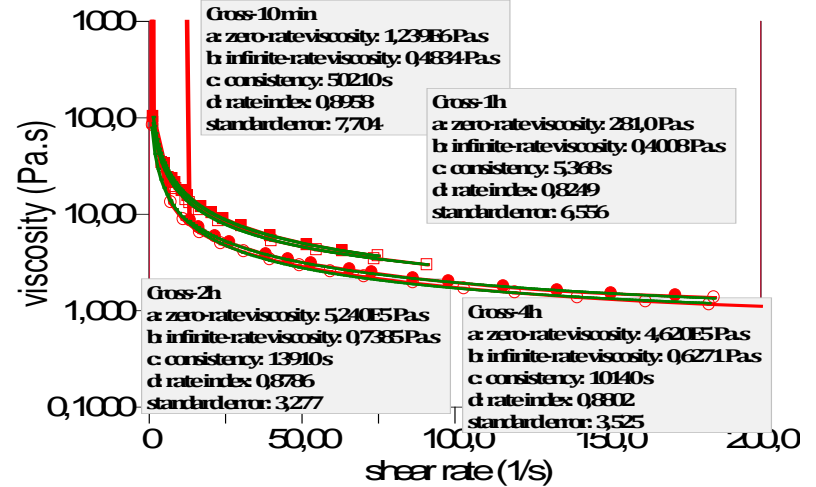




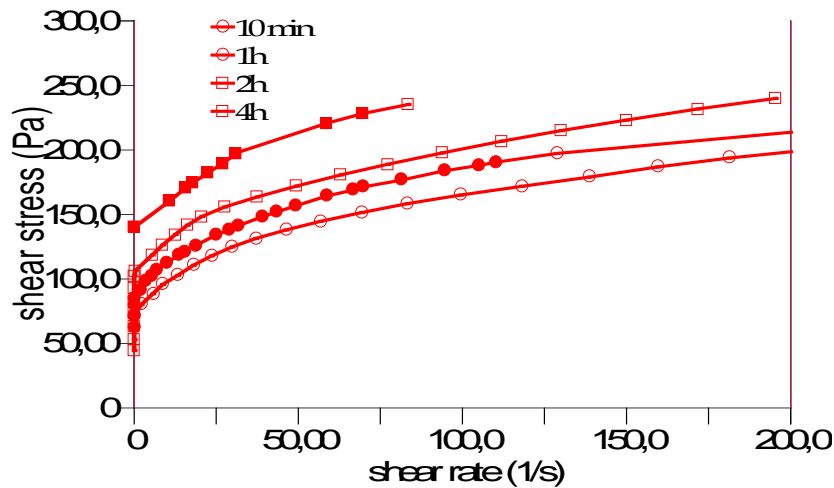
Renblai Dyon70/S@6%/CP-10min, 1h, 2het 4h



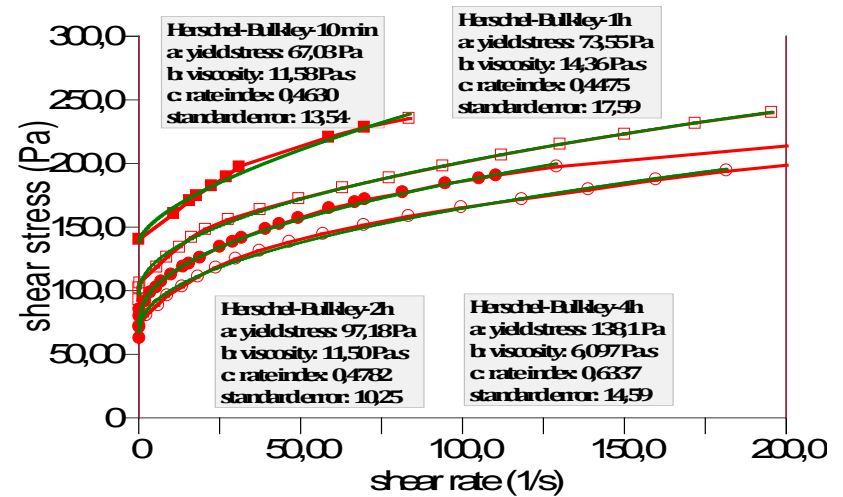
Renblai Dyon70/S@6%/CP-10min, 1h, 2het 4h

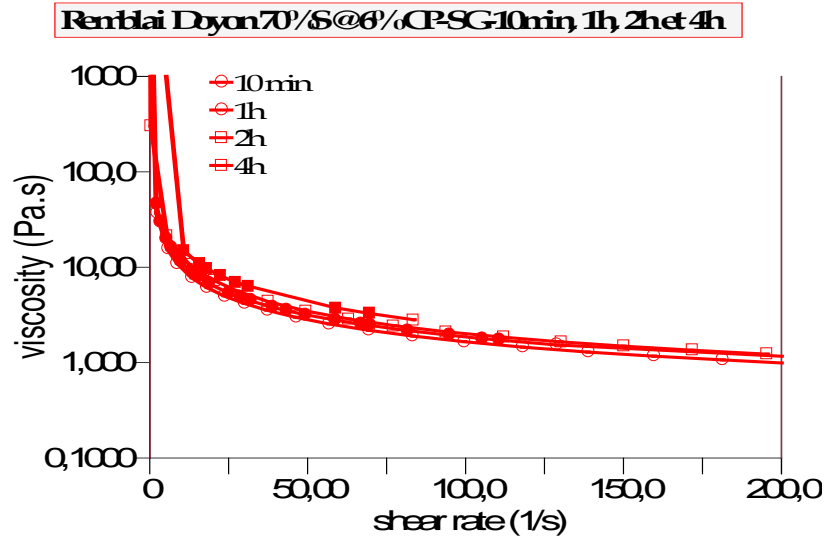
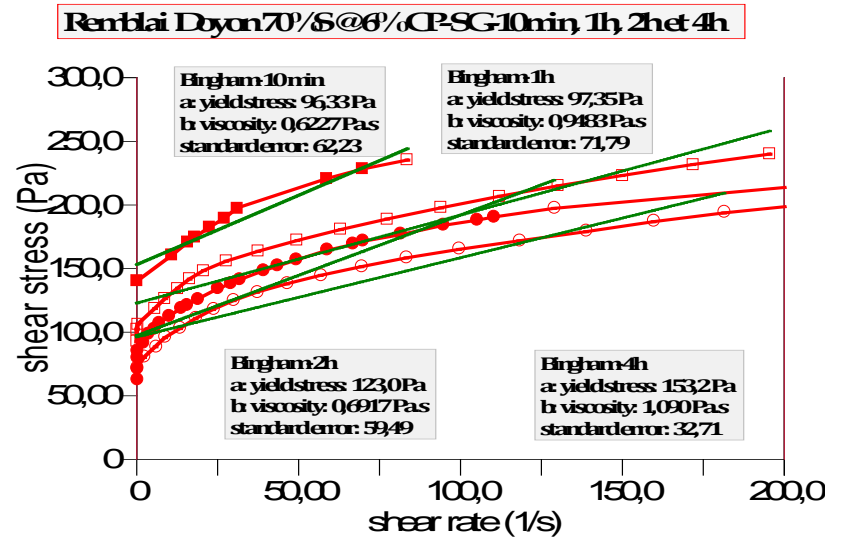
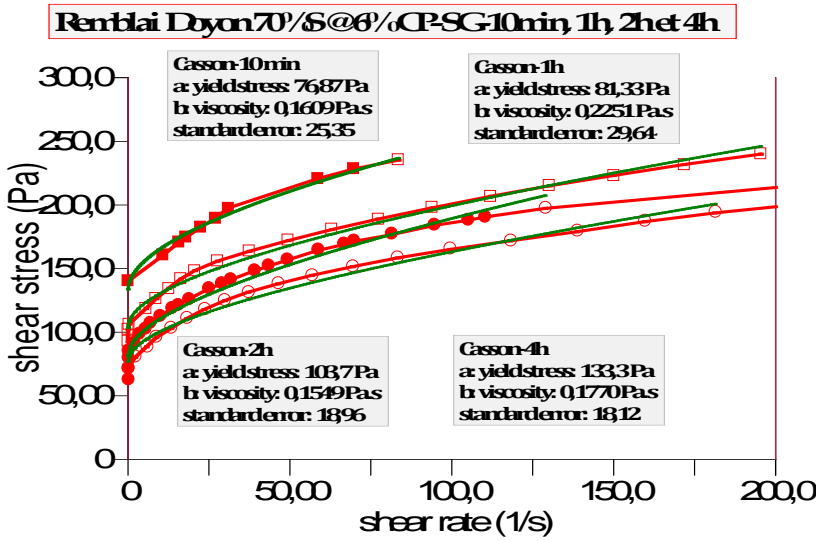


Renblai Dyon70/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2het 4h

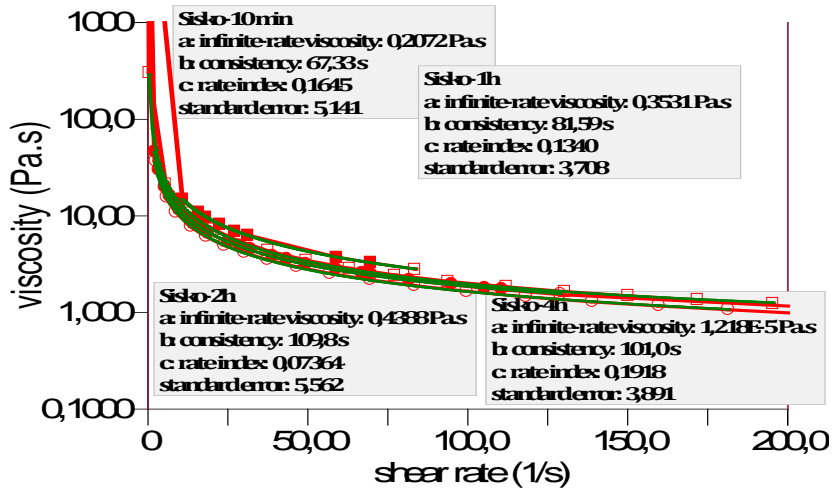


Renblai Dyon70/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2het 4h

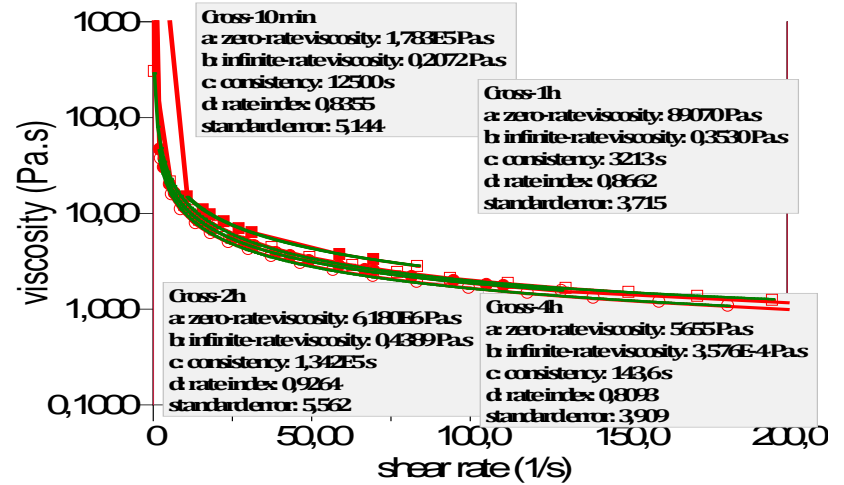




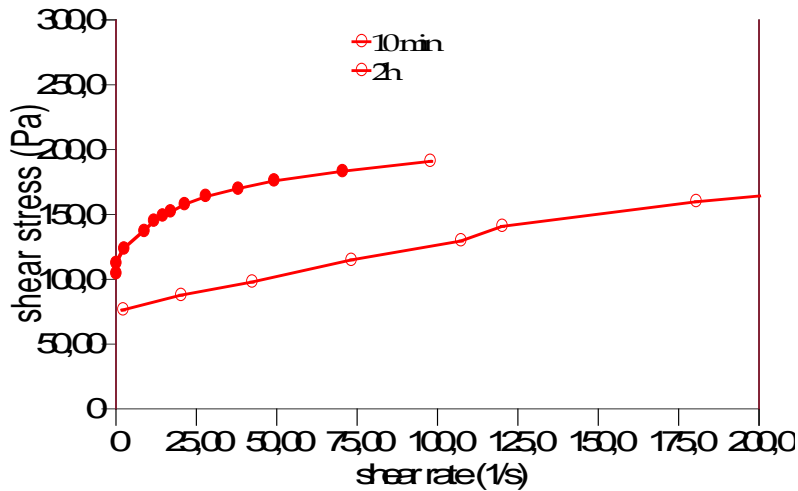
Renblai Dyon 70%/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2het 4h



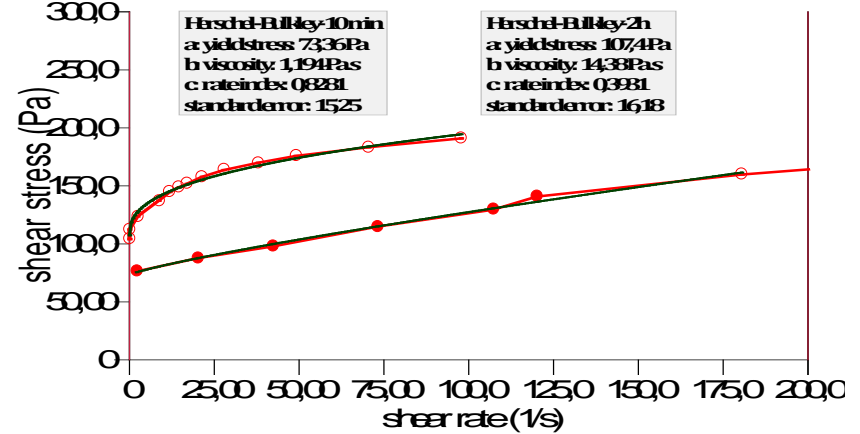
Renblai Dyon 70%/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2het 4h



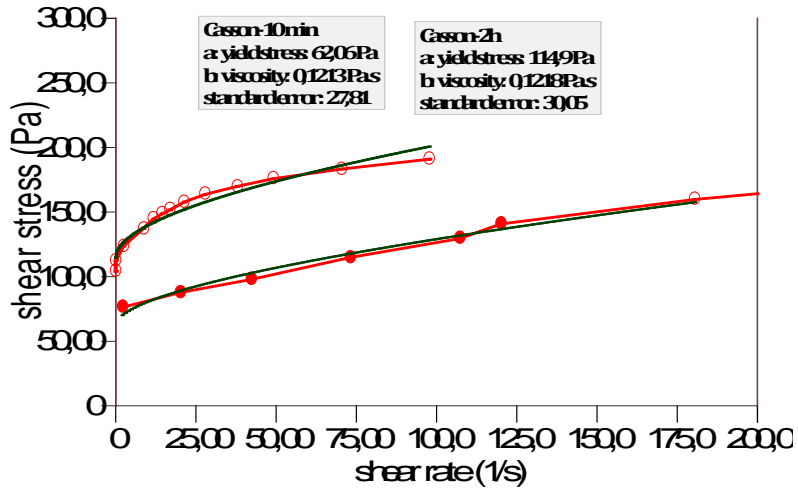
Renblai Dyon 725%/S@2%/CP-10min et 2h



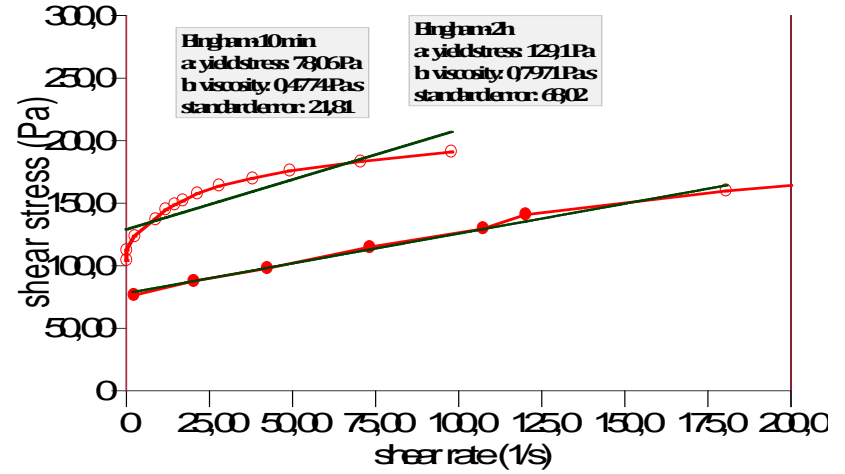
Renblai Dyon 725%/S@2%/CP-10min et 2h



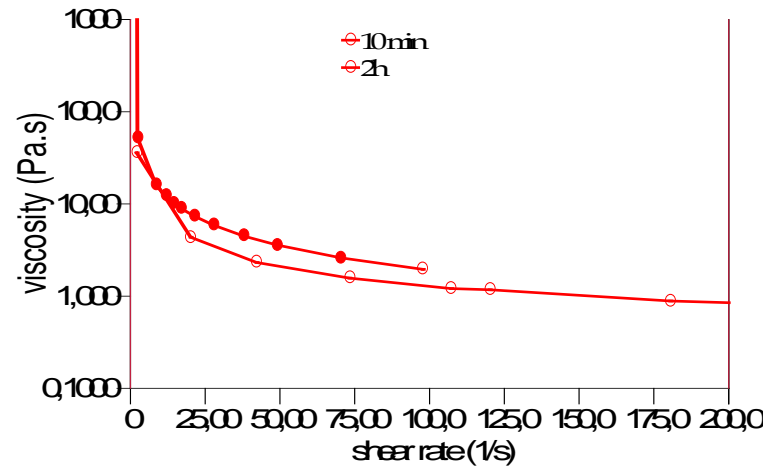
Rentlai Dyon75%/S@2%/CP10minet 2h



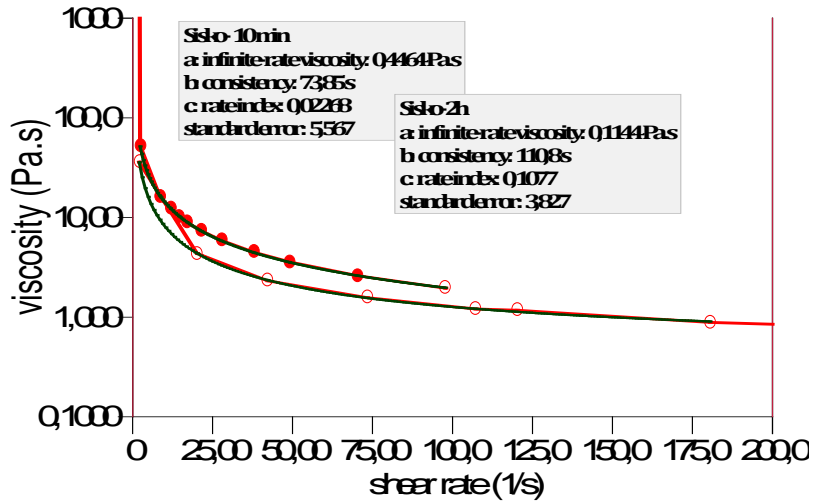
Rentlai Dyon75%/S@2%/CP10minet 2h



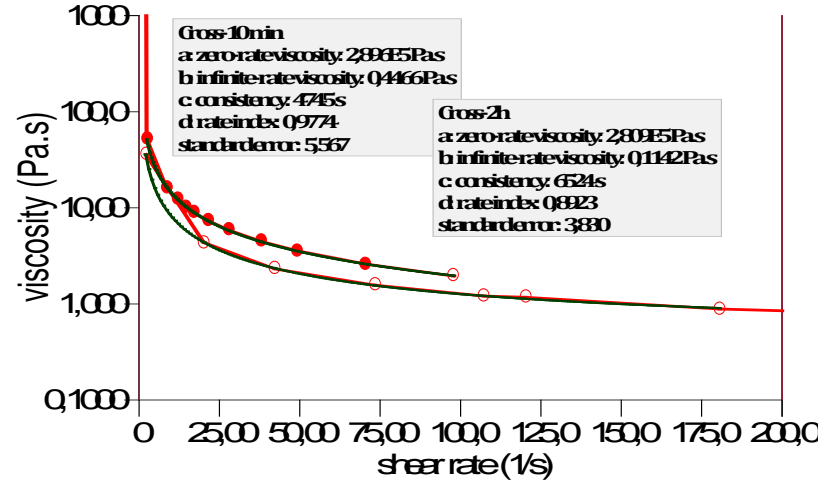
Rentlai Dyon75%/S@2%/CP10minet 2h



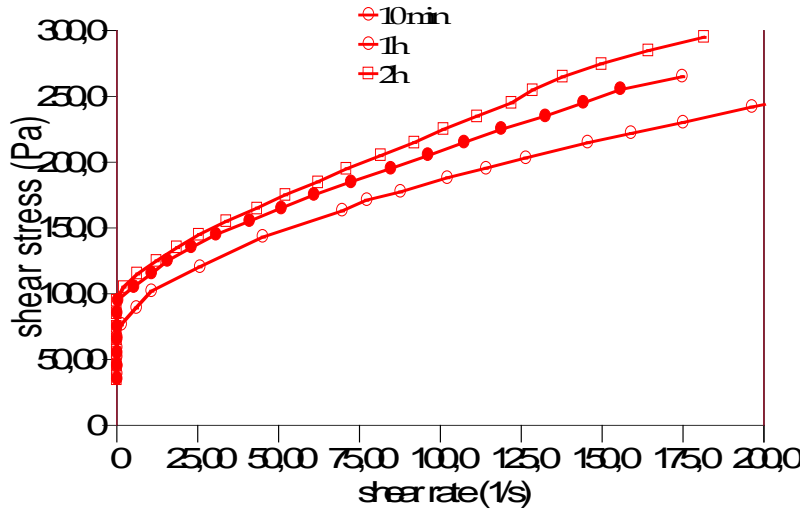
Renblai Dyon75/S@2/CP10minet 2h



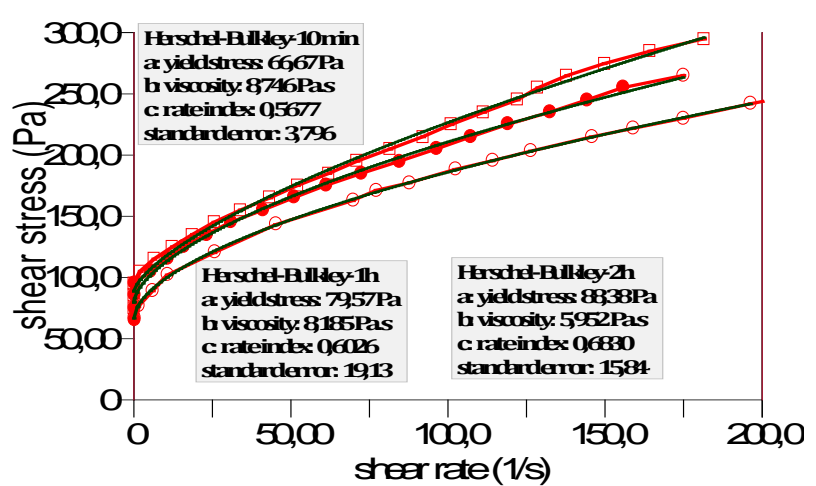
Renblai Dyon75/S@2/CP10minet 2h



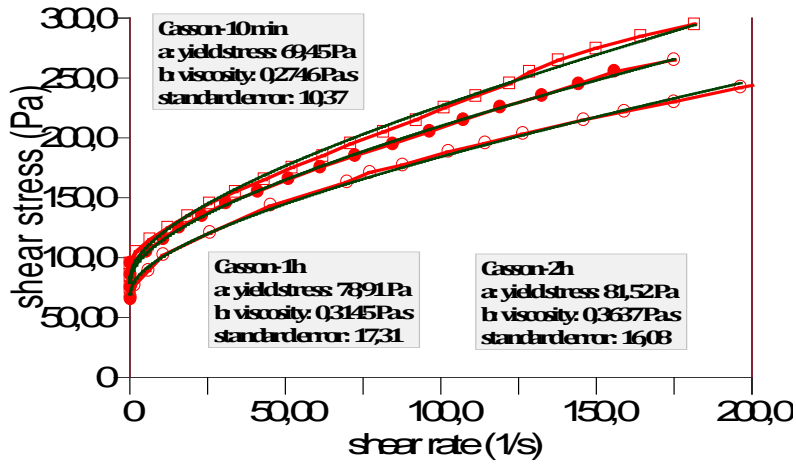
Renblai Dyon75/S@2/CPSG10min, 1h, 2h



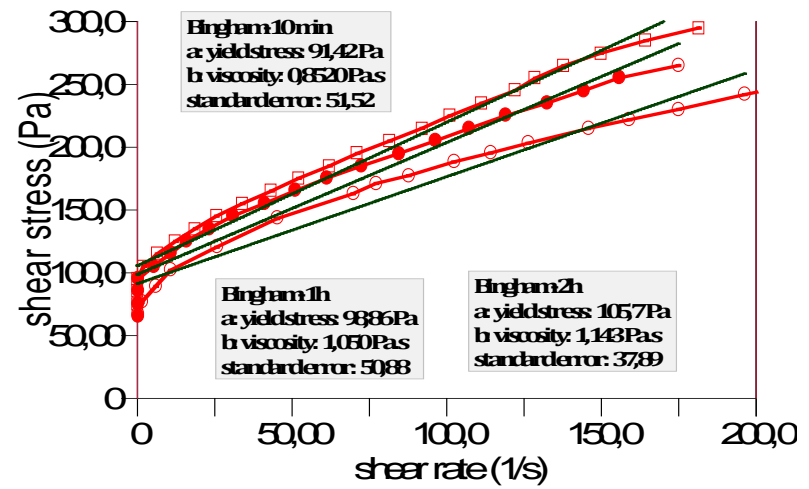
Renblai Dyon75/S@2/CPSG10min, 1h, 2h



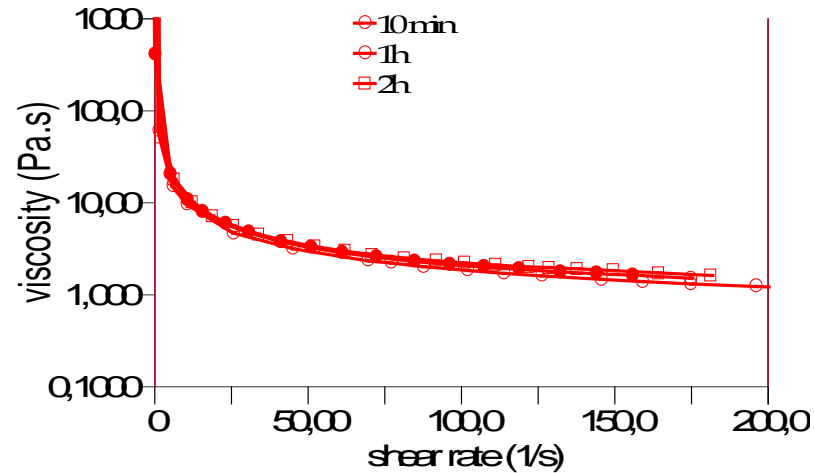
Renblai Dyon 725/S@2/CP-SG-10min, 1h, 2h



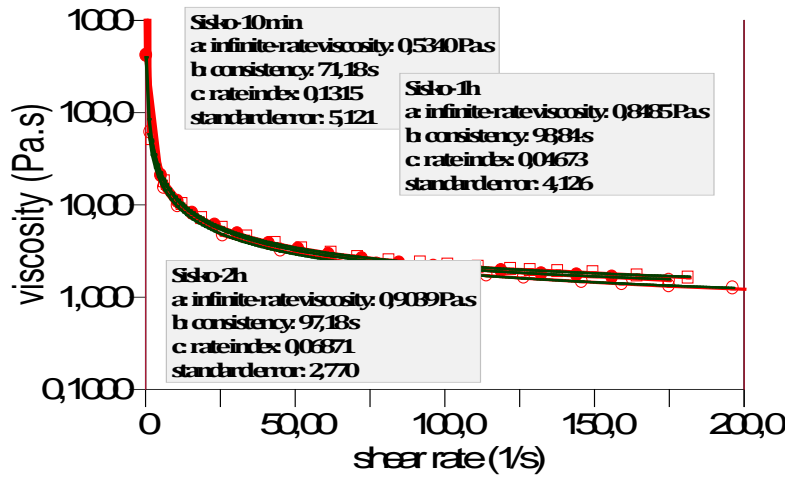
Renblai Dyon 725/S@2/CP-SG-10min, 1h, 2h



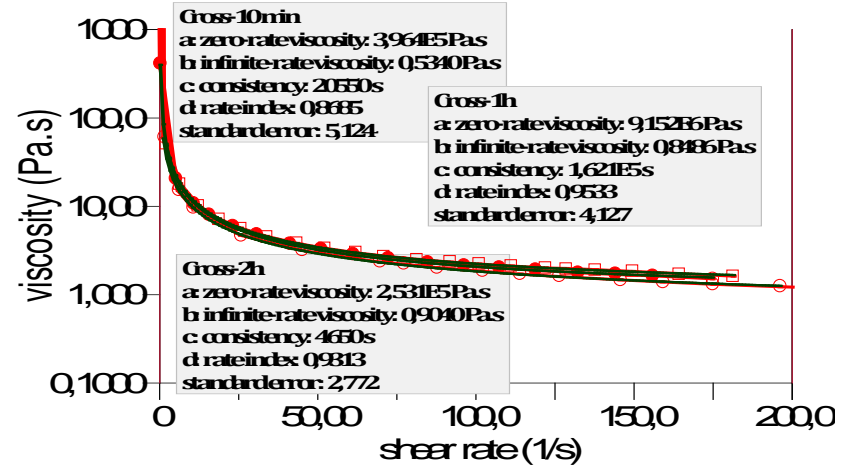
Renblai Dyon 725/S@2/CP-SG-10min, 1h, 2h



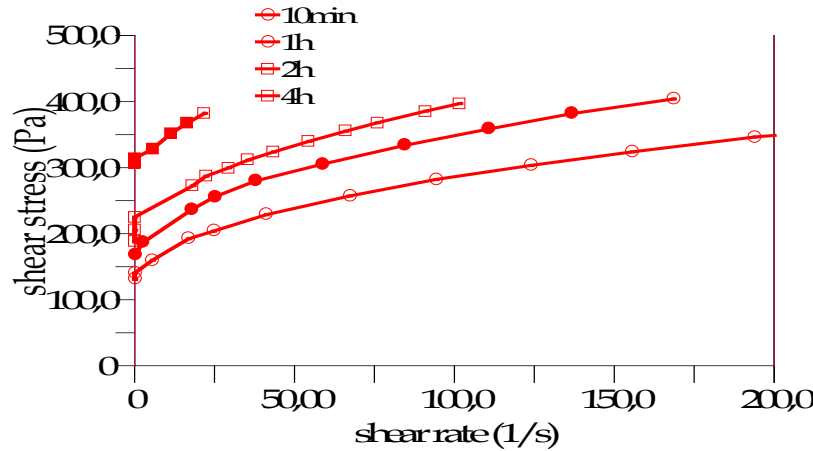
Renblai Dyon72,5%/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h



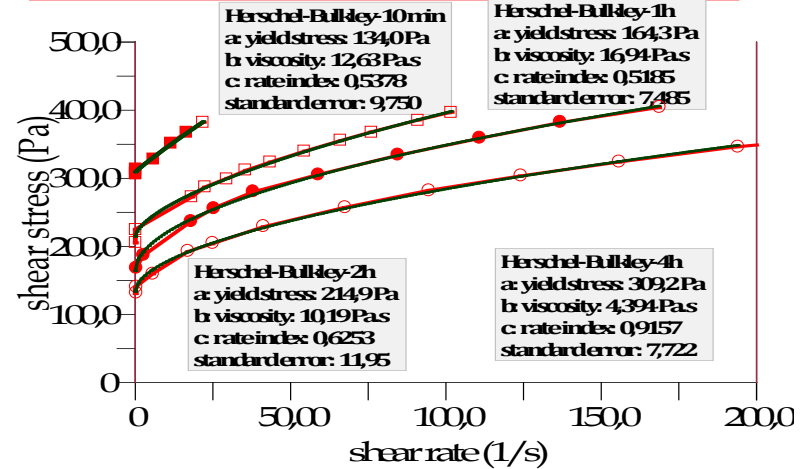
Renblai Dyon72,5%/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h

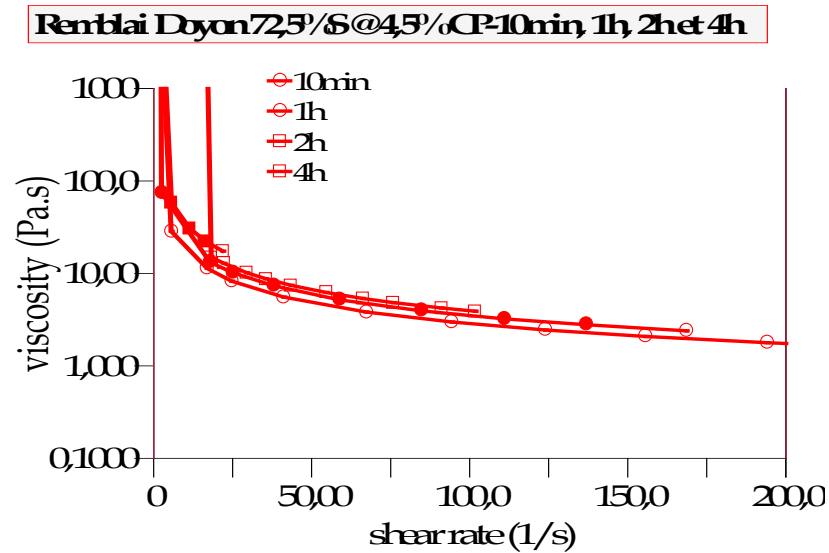
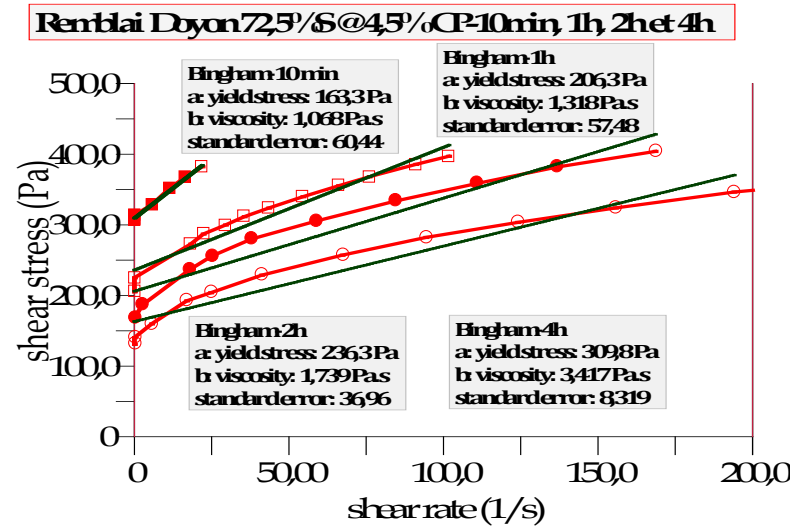
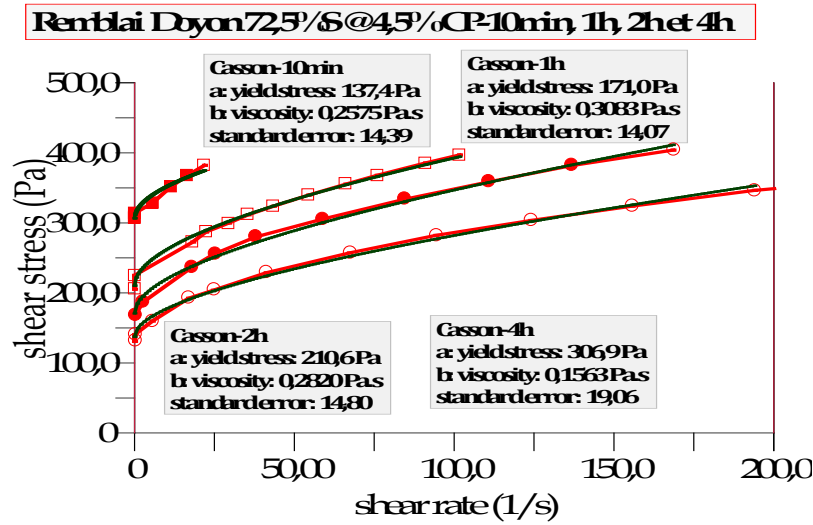


Renblai Dyon72,5%/S@4,5%/CP-10min, 1h, 2h et 4h

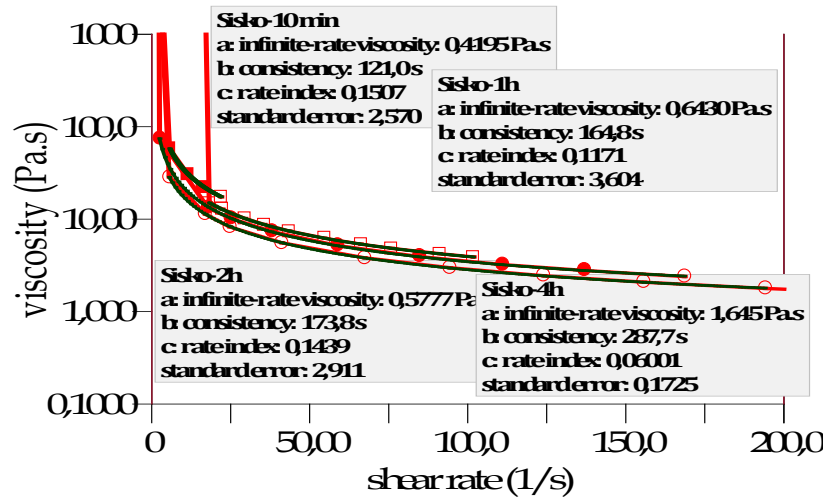


Renblai Dyon72,5%/S@4,5%/CP-10min, 1h, 2h et 4h

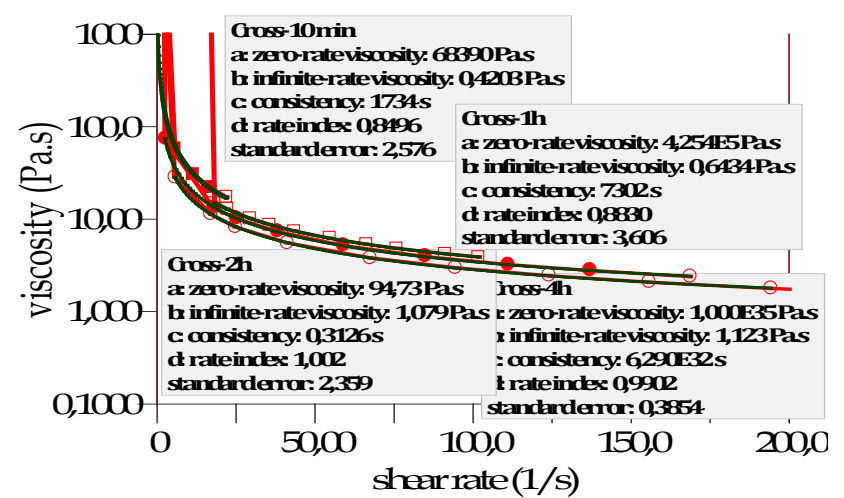




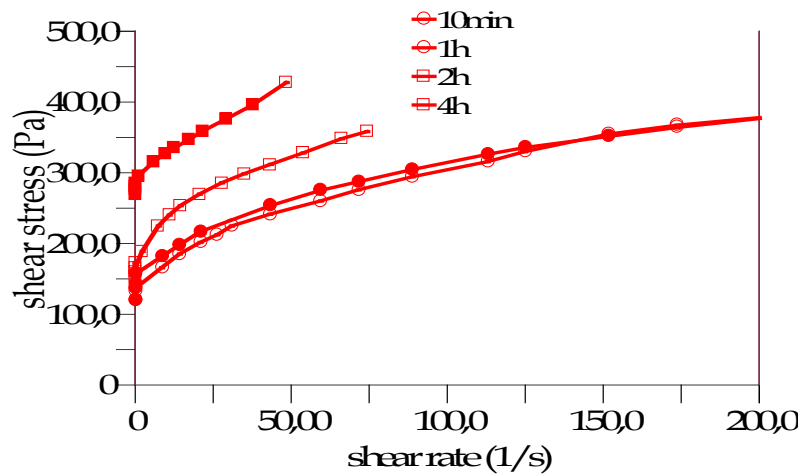
Renblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-10 min, 1h, 2h et 4h



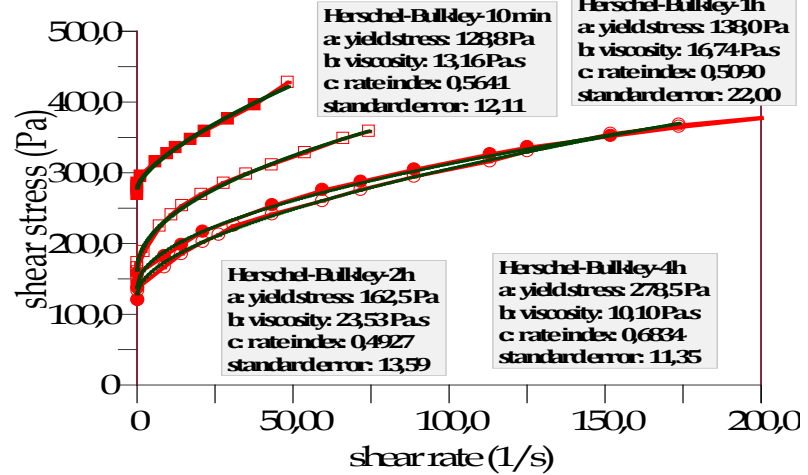
Renblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-10 min, 1h, 2h et 4h



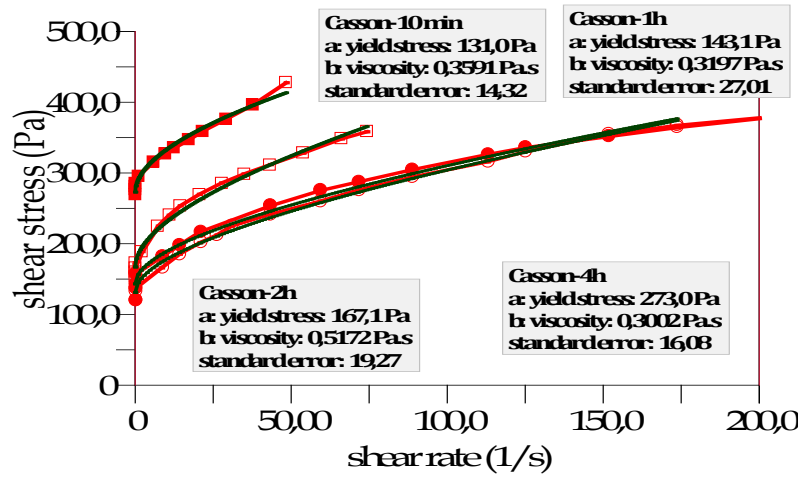
Renblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



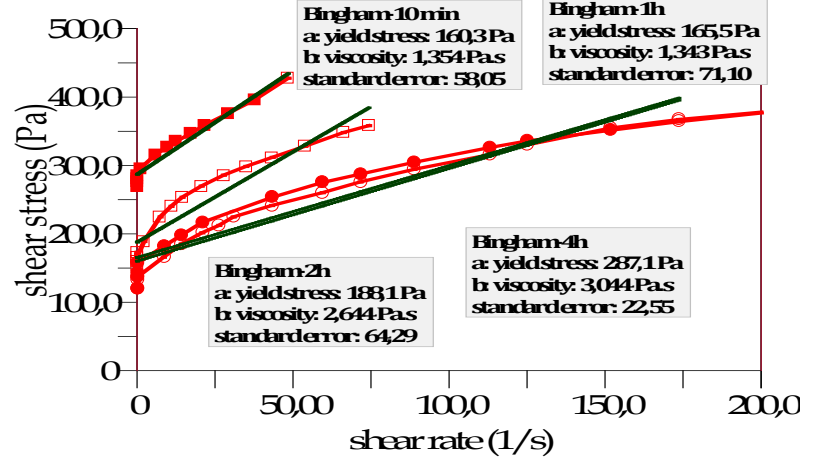
Renblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



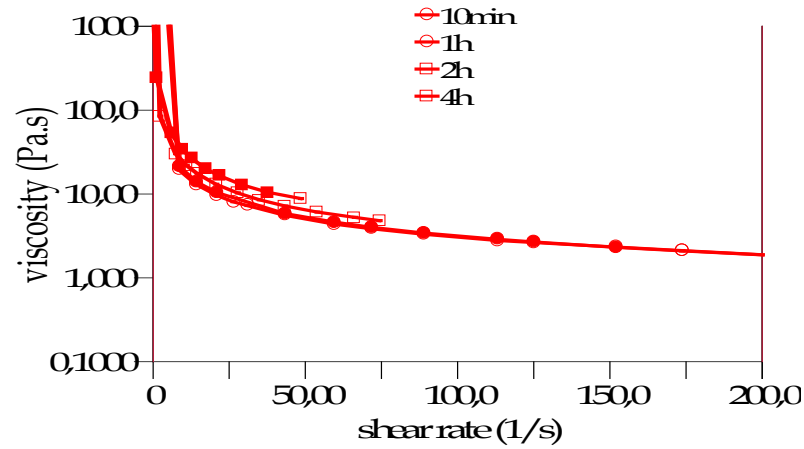
Remblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



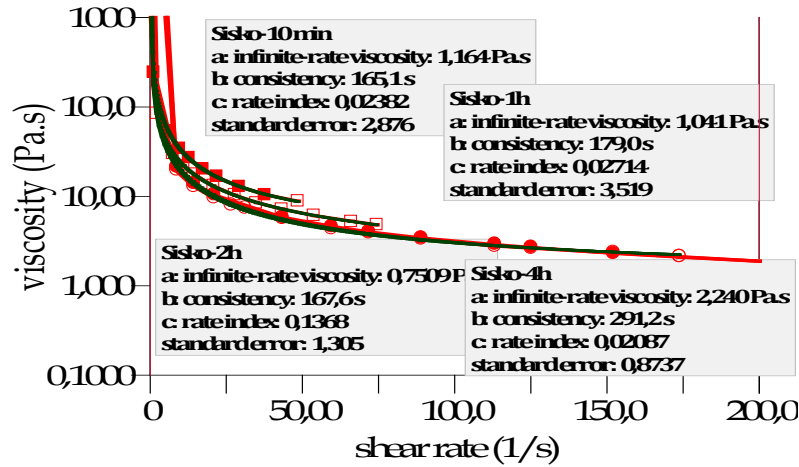
Remblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



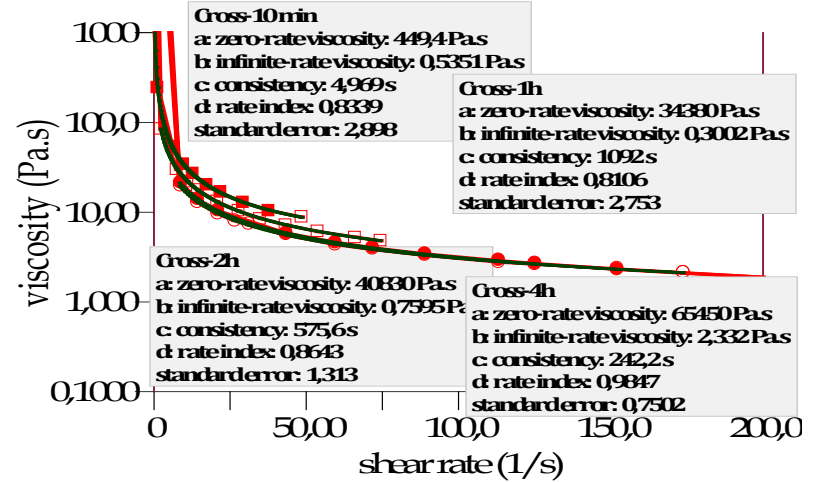
Remblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



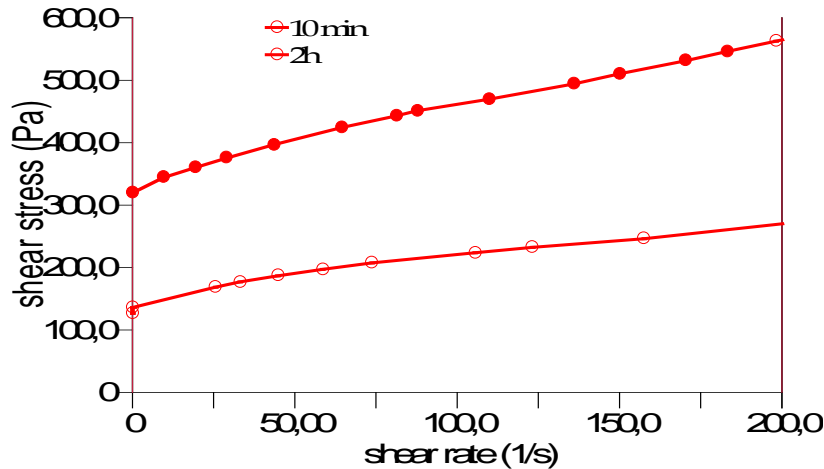
Remblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



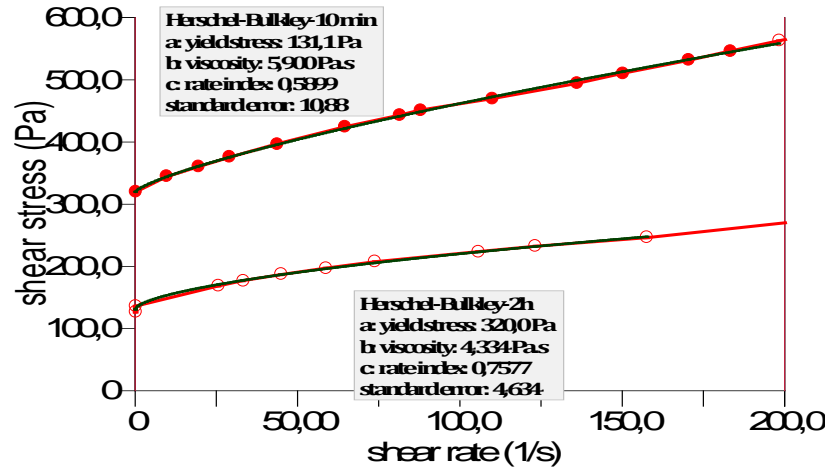
Remblai Dyon 72,5% S @ 4,5% CP-SG-10 min, 1h, 2h et 4h



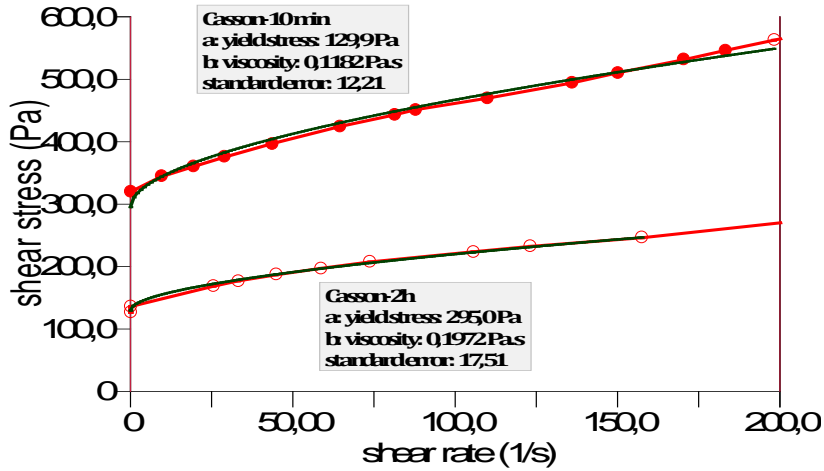
Remblai Dyon 72,5% S @ 6% CP-10 min et 2h



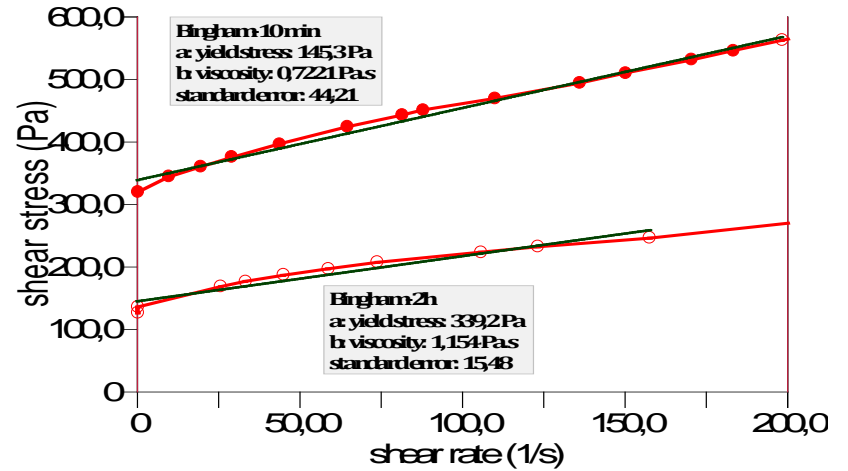
Remblai Dyon 72,5% S @ 6% CP-10 min et 2h



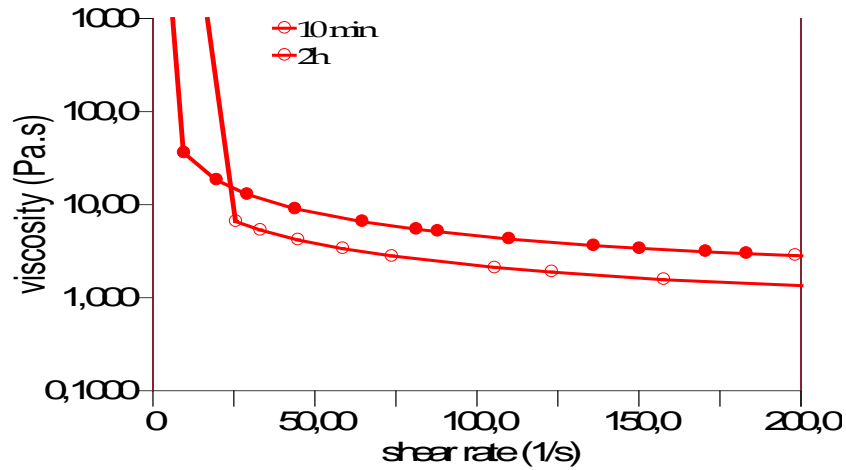
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-10min et 2h



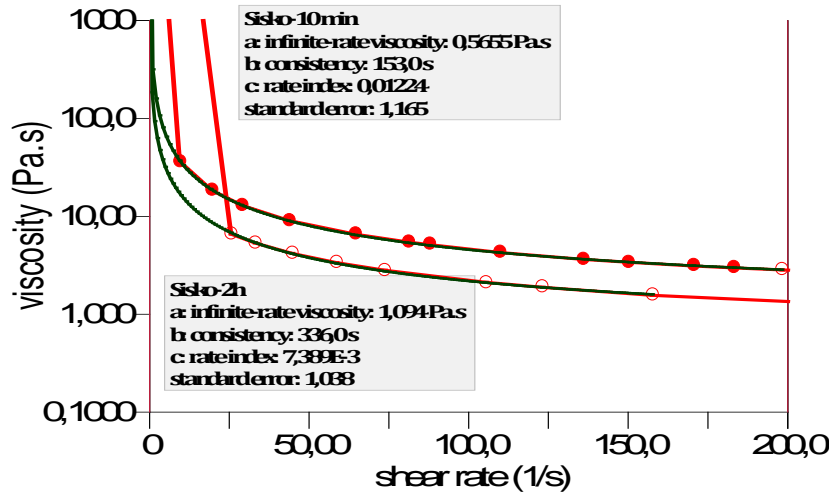
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-10min et 2h



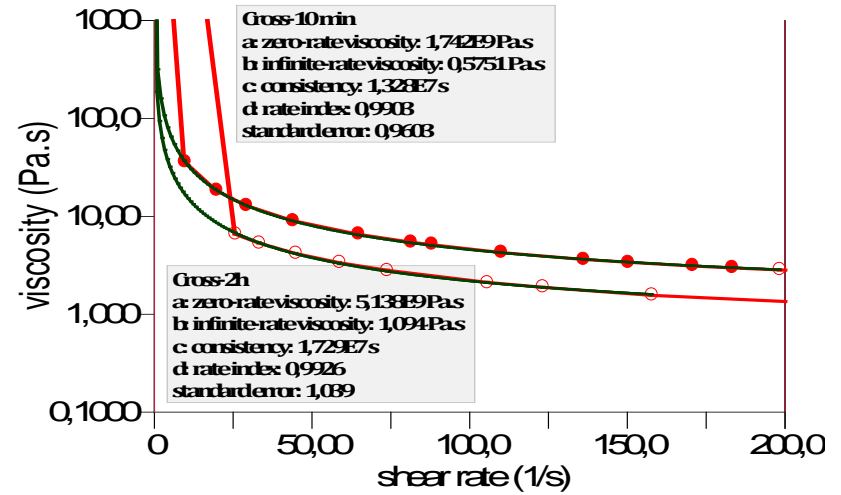
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-10min et 2h



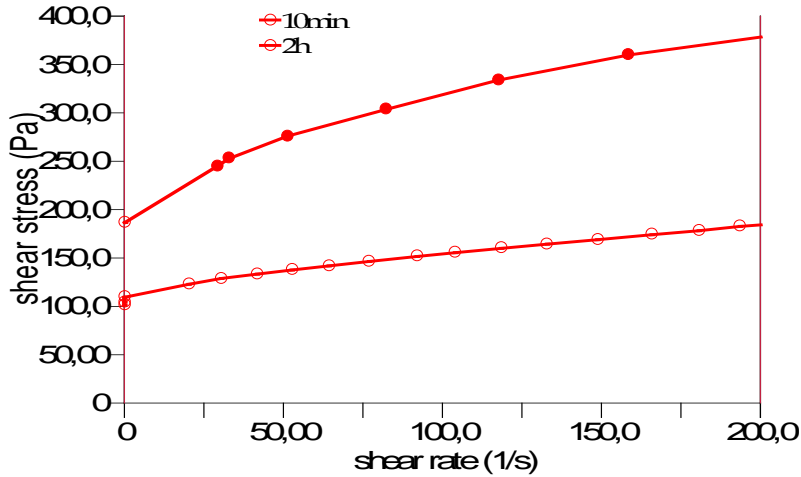
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-10min et 2h



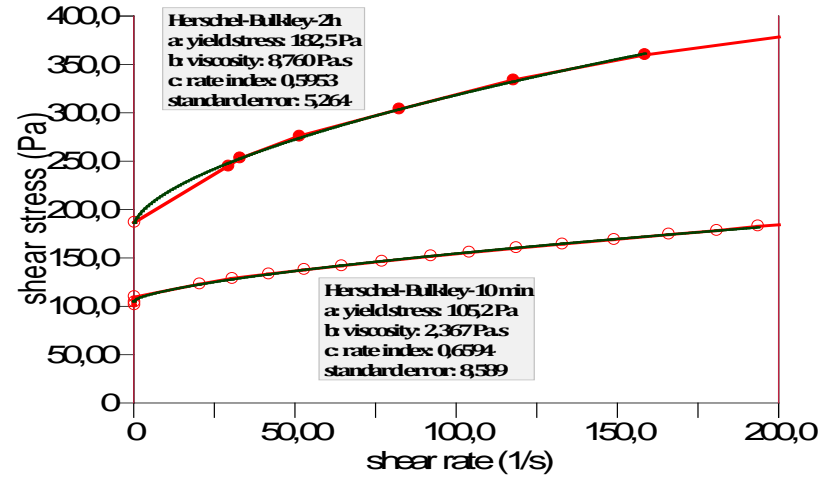
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-10min et 2h



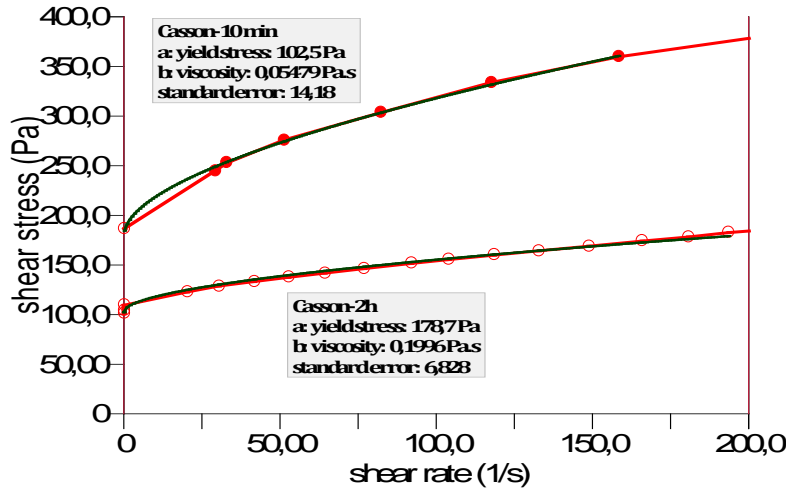
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-SG-10min et 2h



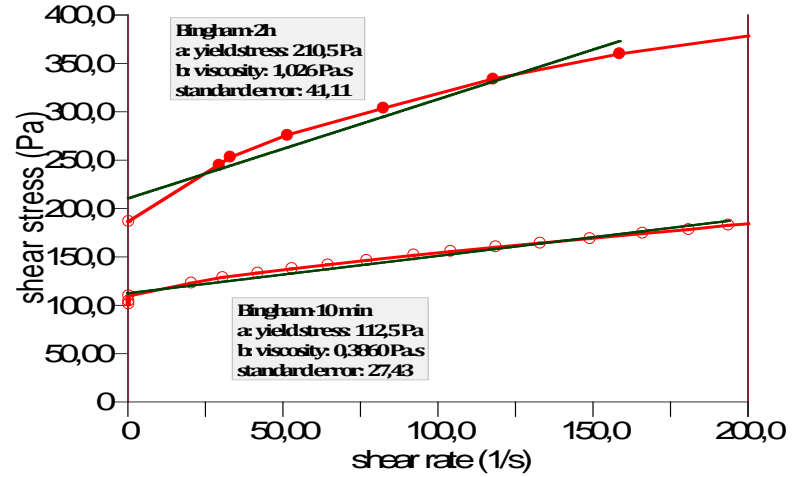
Renblai Dyon 7,5% S@6% CP-SG-10min et 2h



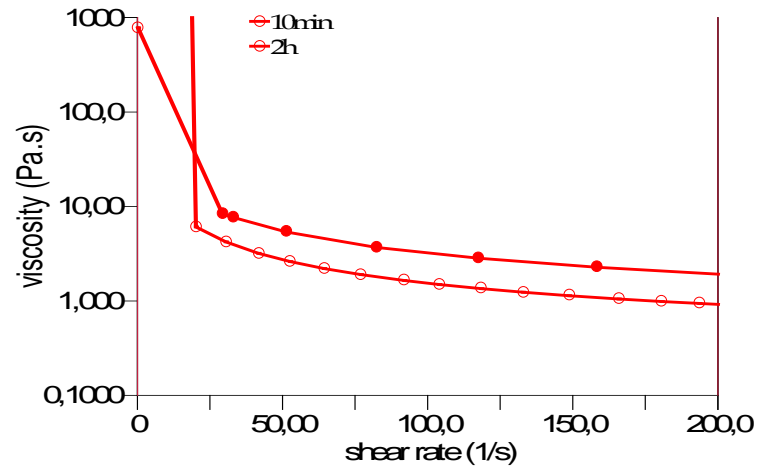
Renblai Dyon 72,5% S@6% CP-SG-10 min et 2h



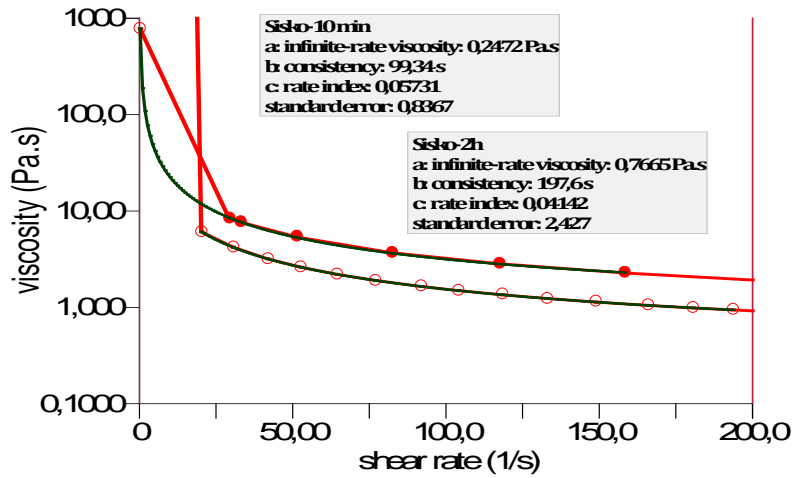
Renblai Dyon 72,5% S@6% CP-SG-10 min et 2h



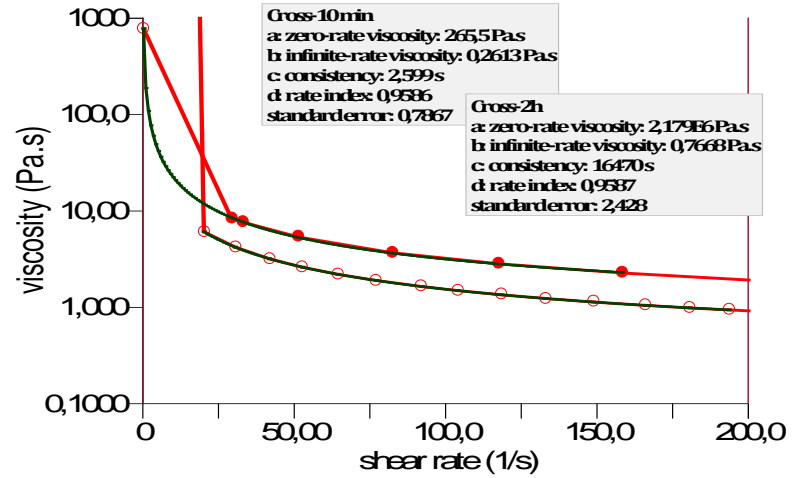
Renblai Dyon 72,5% S@6% CP-SG-10 min et 2h



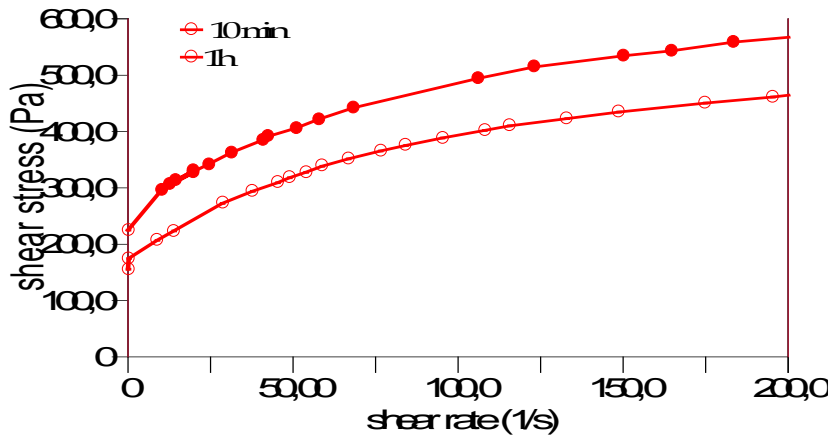
Remblai Doyon 7,5% S @ 6% CP-SG-10 min et 2h



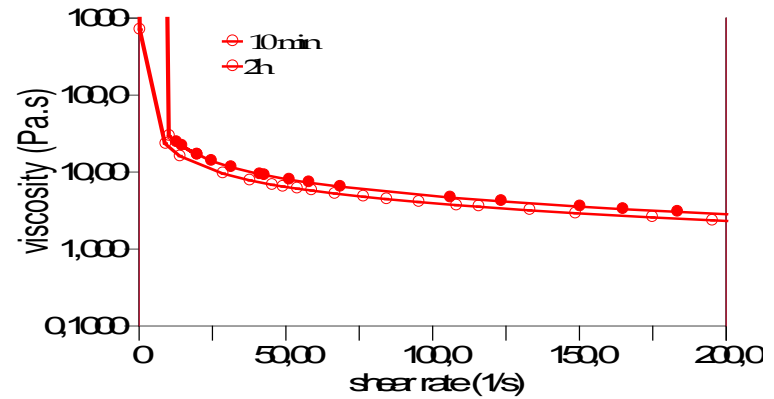
Remblai Doyon 7,5% S @ 6% CP-SG-10 min et 2h



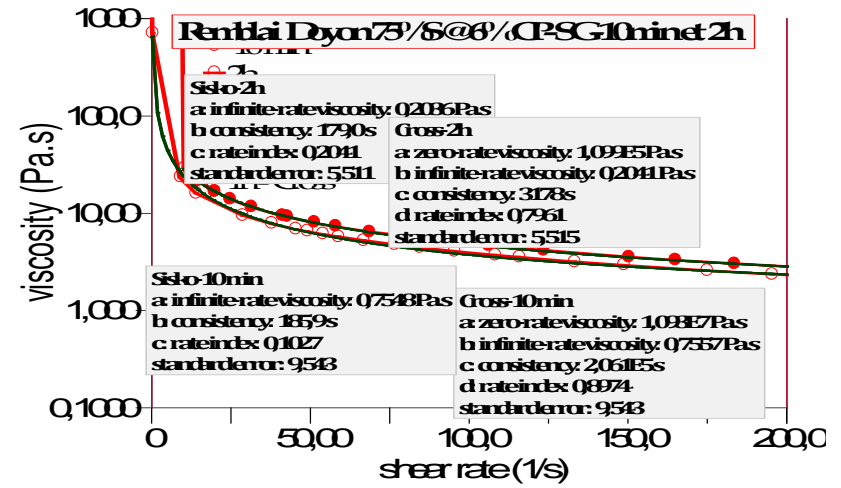
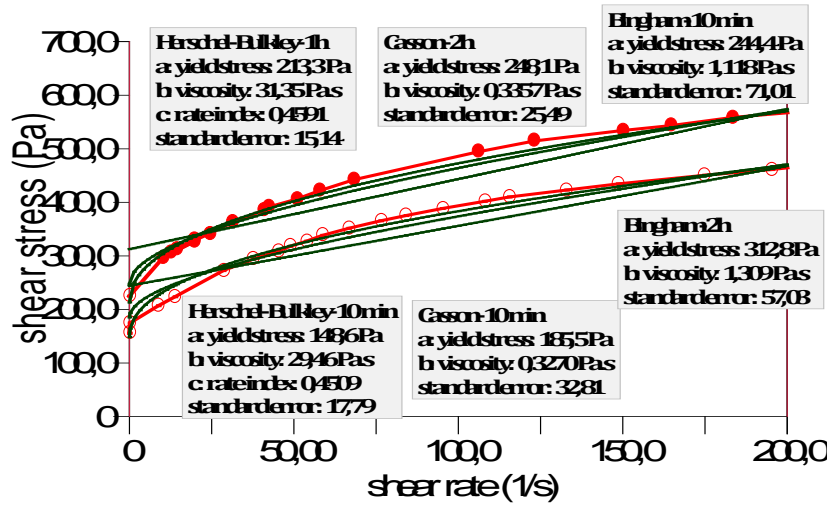
Remblai Doyon 75% S @ 6% CP-SG-10min et 2h



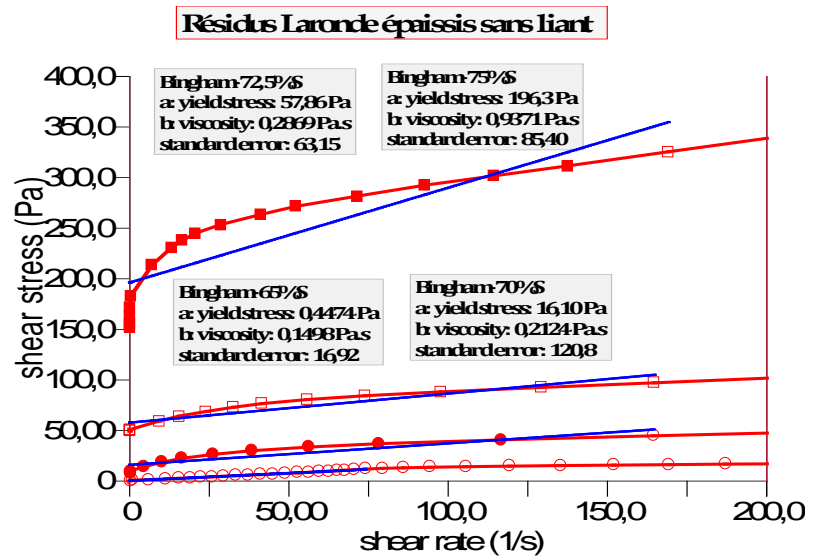
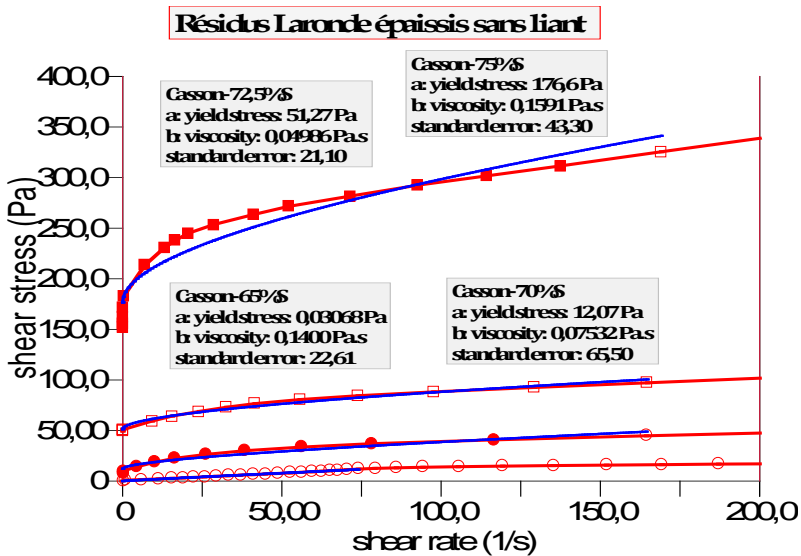
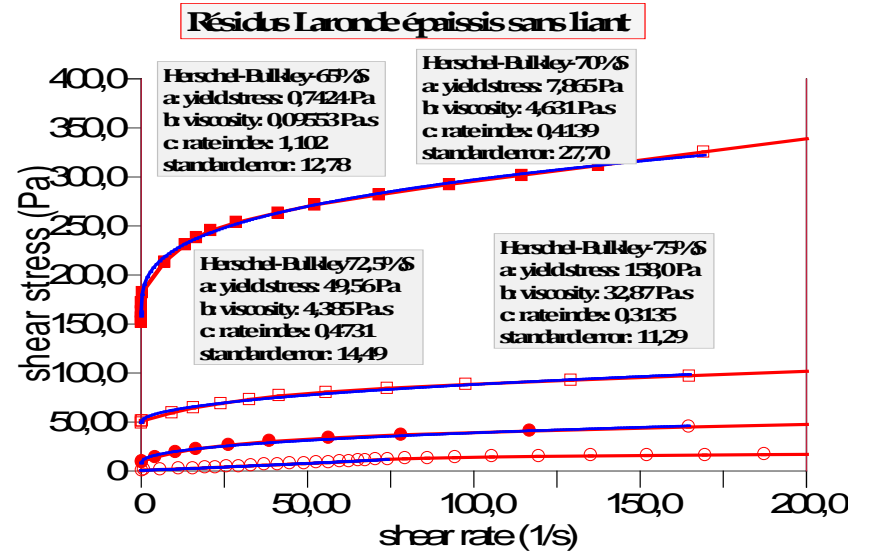
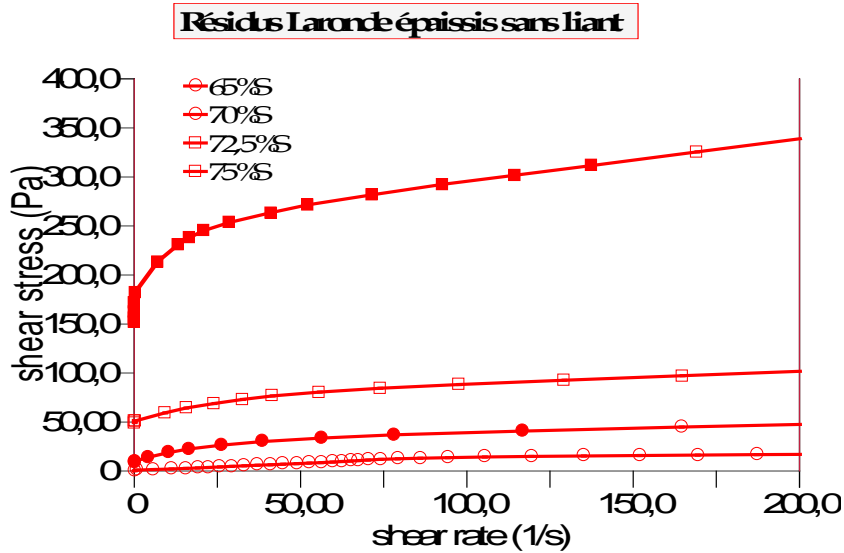
Remblai Doyon 7,5% S @ 6% CP-SG-10min et 2h



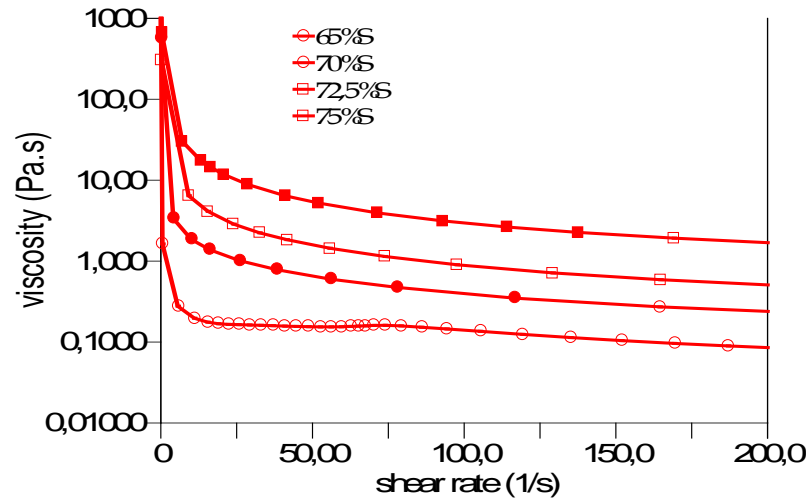
Remblai Dyon 75%S @ 6% CP-SG-10min et 2h



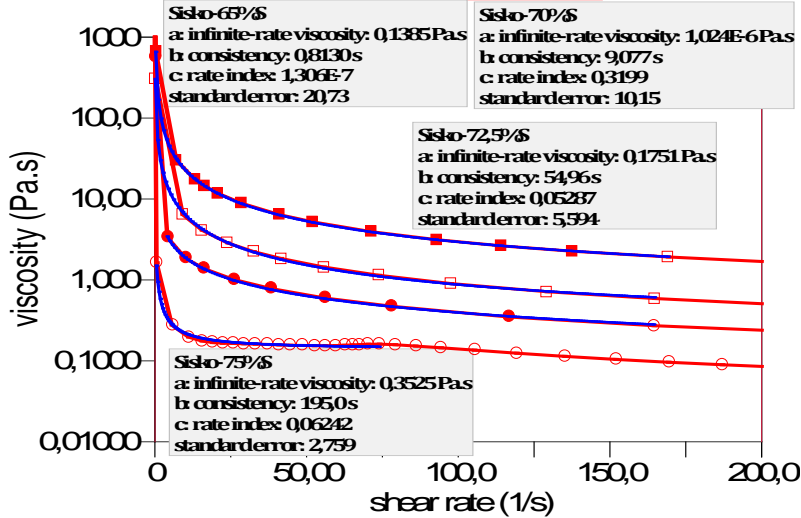
Ajustement des courbes d'écoulement et de viscosité des recettes à base de résidus LaRonde



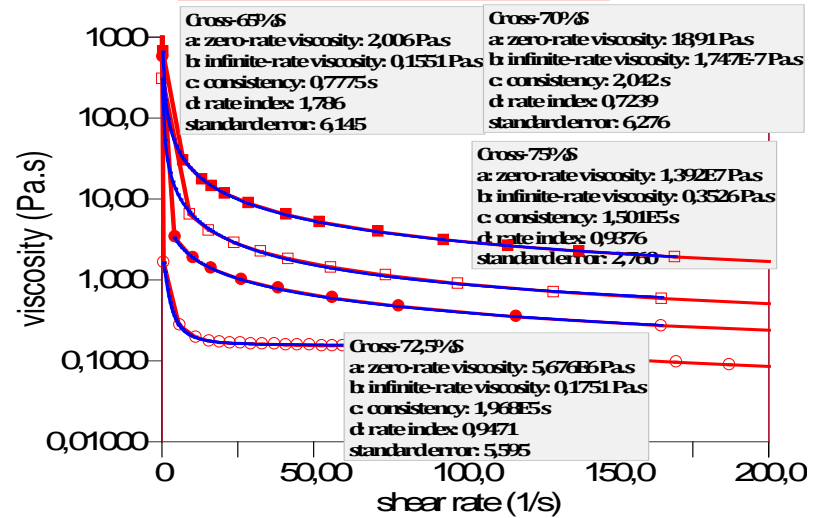
Résidus Laronde épaissis sans liant



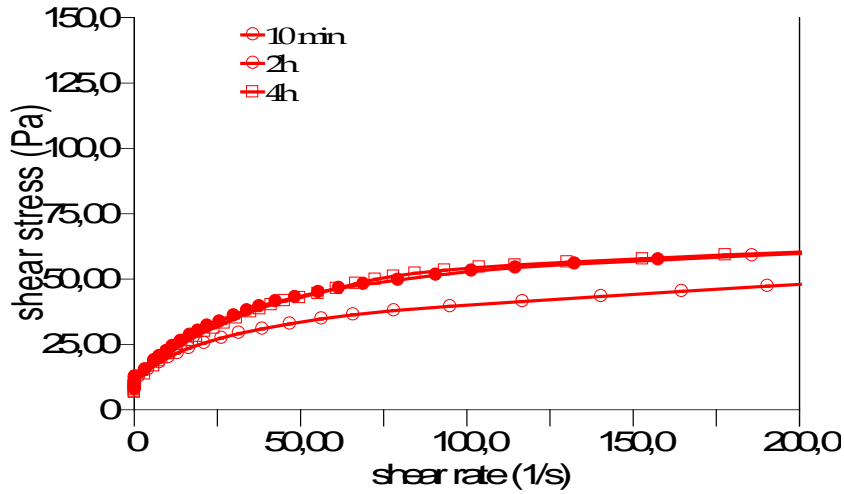
Résidus Laronde épaissis sans liant



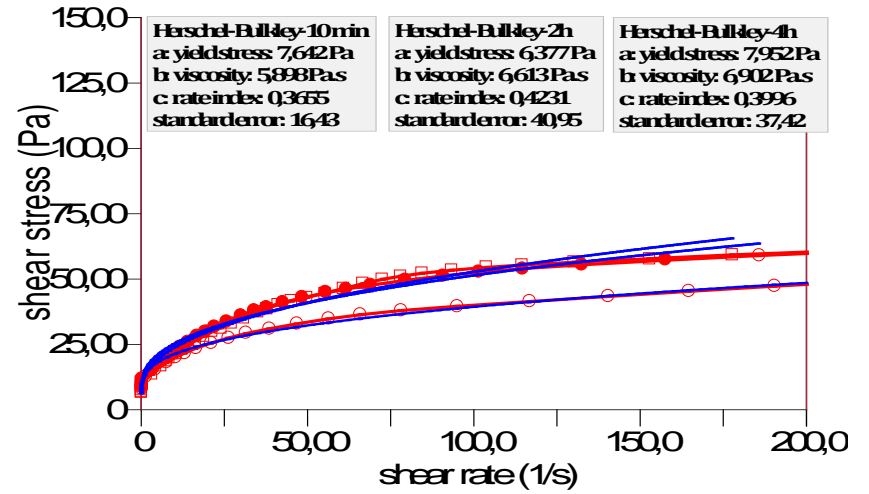
Résidus Laronde épaissis sans liant



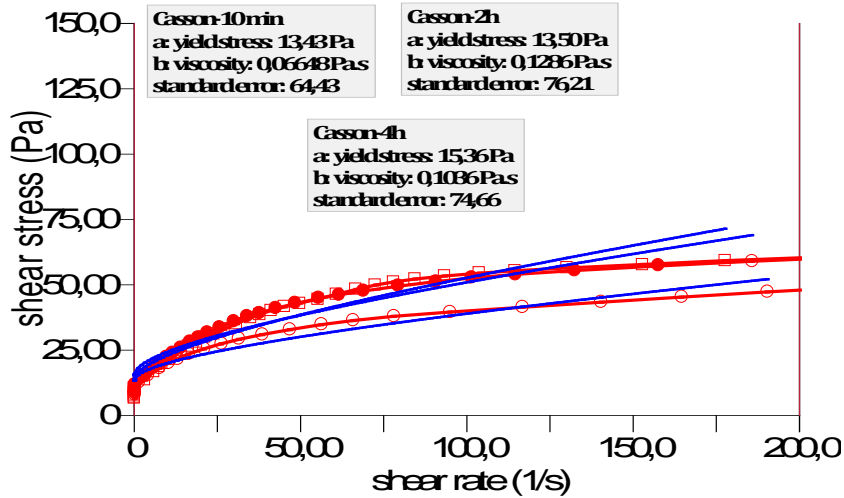
Résidu Laronde 70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



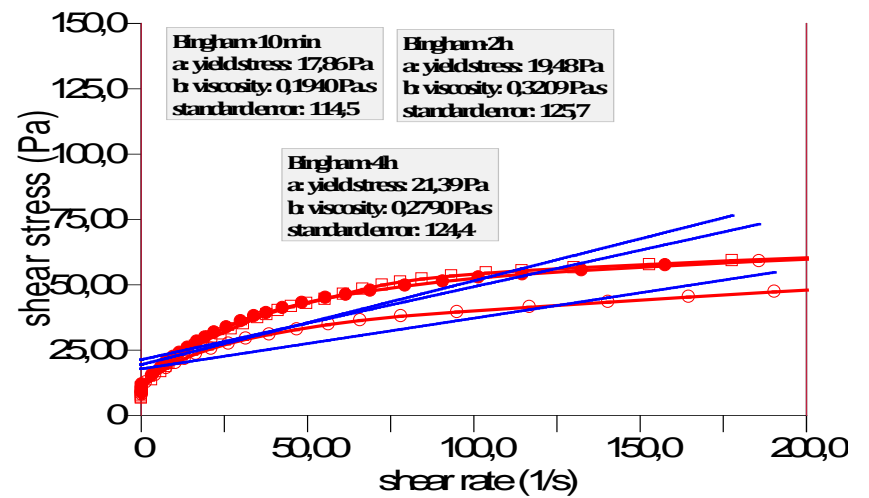
Résidu Laronde 70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



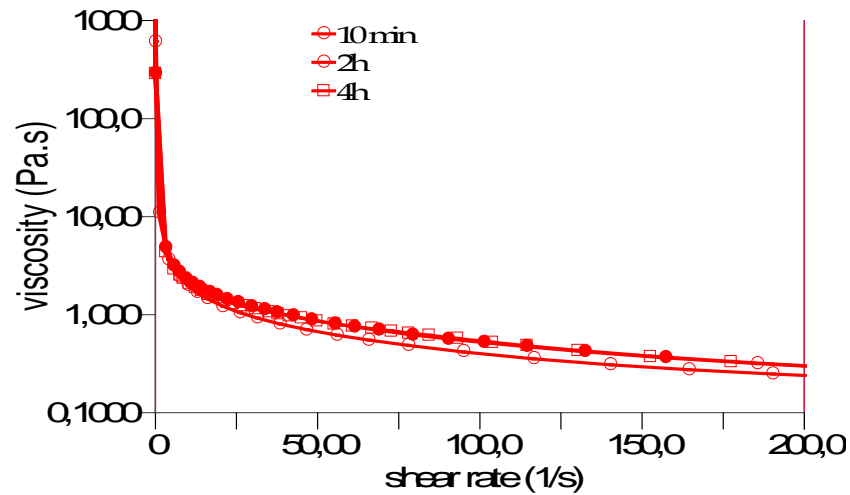
Résidu Laronde 70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



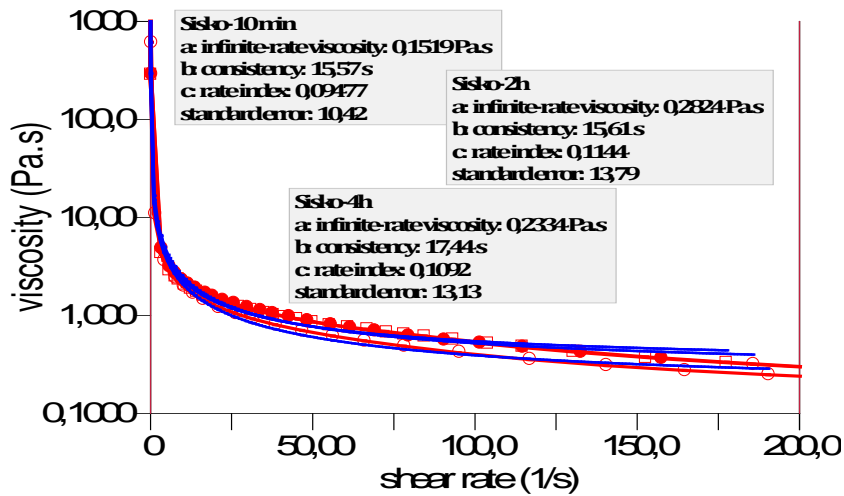
Résidu Laronde 70/S@0/diart-10min, 2h et 4h



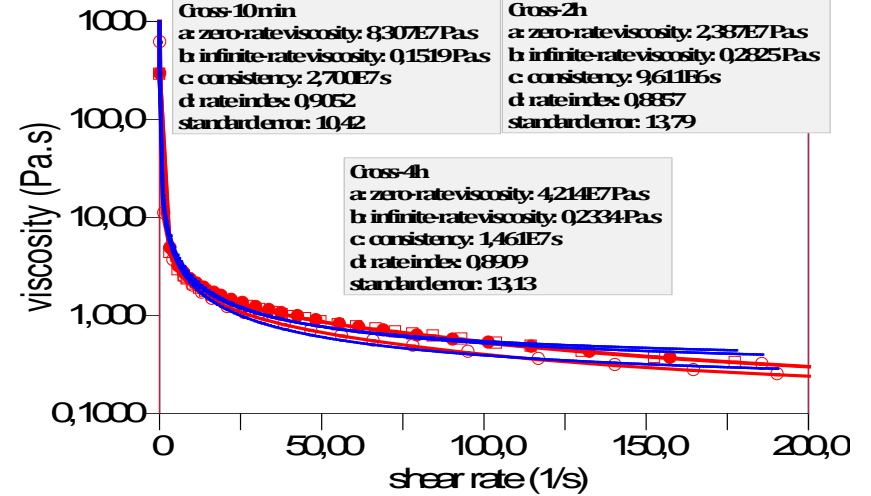
Résidu Laronde 70%/S@0%/diart-10min, 2h et 4h



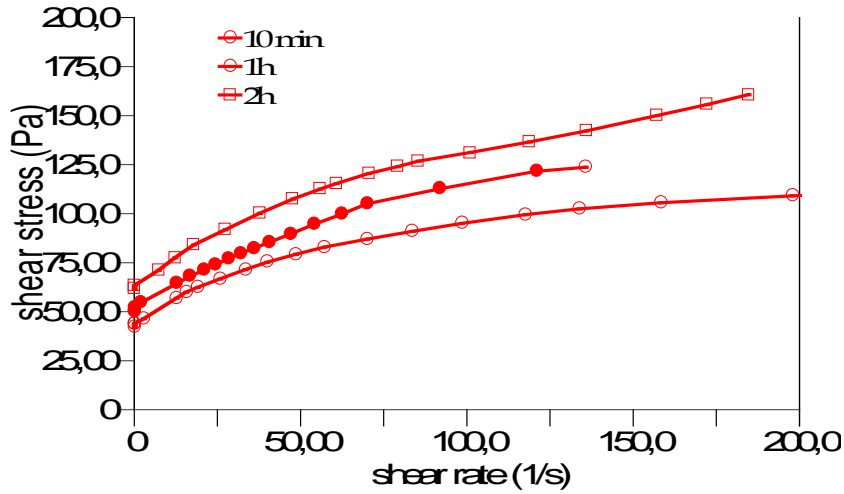
Résidu Laronde 70%/S@0%/diart-10min, 2h et 4h



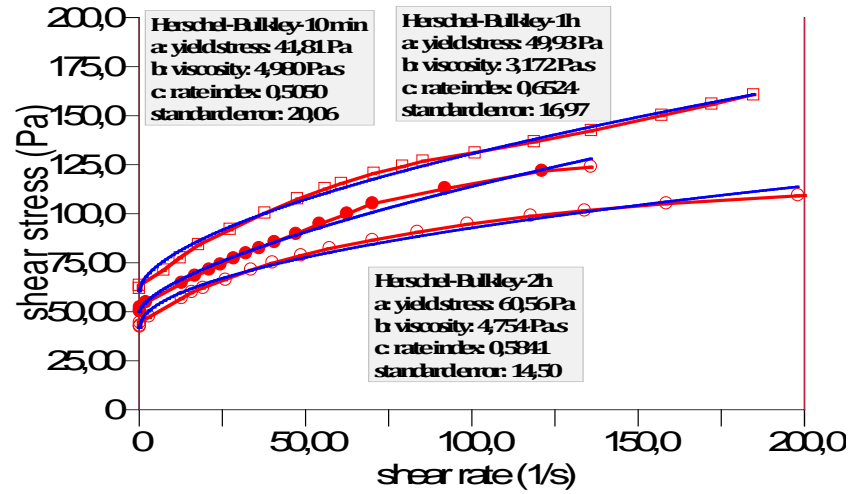
Résidu Laronde 70%/S@0%/diart-10min, 2h et 4h



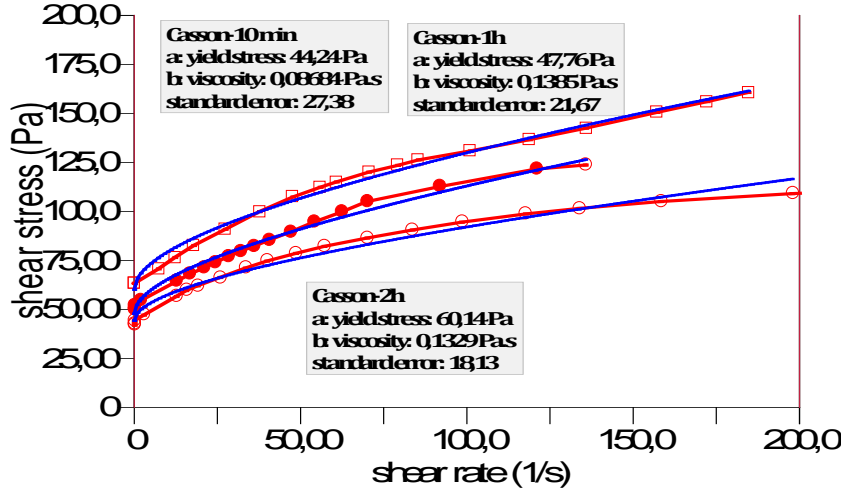
Résidu Latex 70/S@2%/CP-10min, 1h et 2h



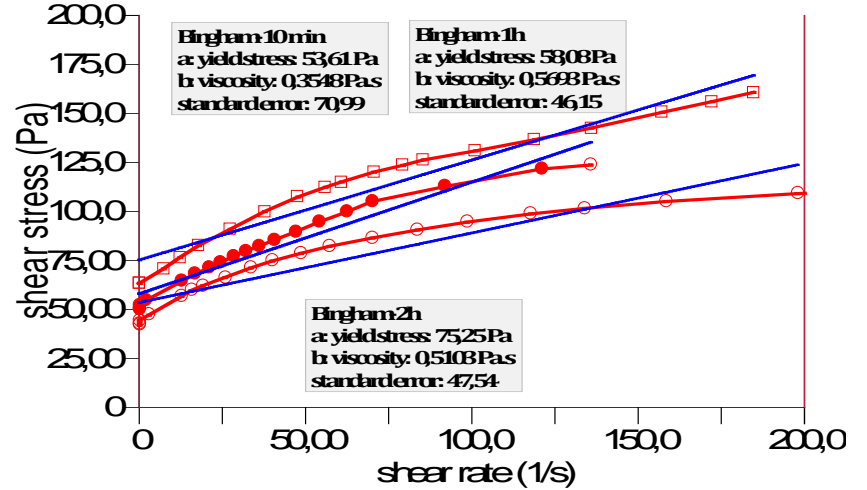
Résidu Latex 70/S@2%/CP-10min, 1h et 2h



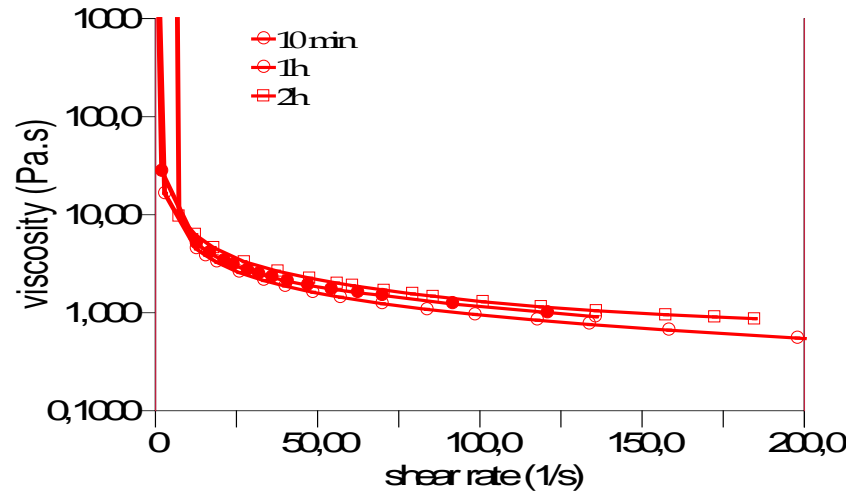
Résidu Latex 70/S@2%/CP-10min, 1h et 2h



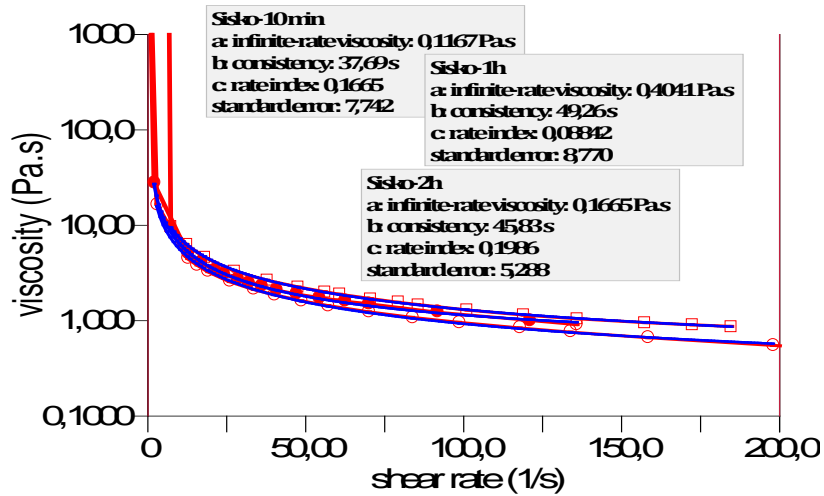
Résidu Latex 70/S@2%/CP-10min, 1h et 2h



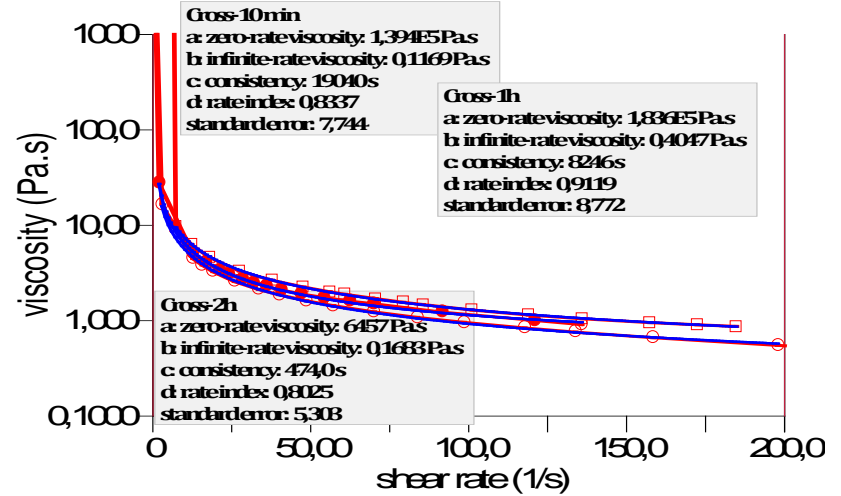
Résidu Laronde 70/S@2%/CP-10 min, 1h et 2h



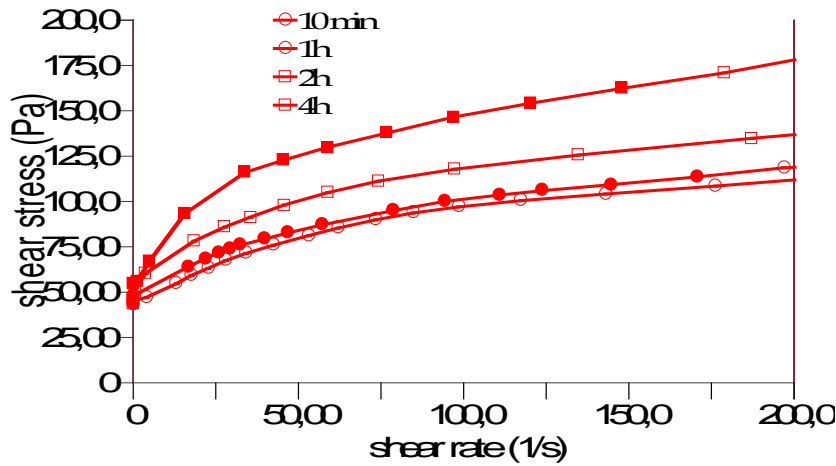
Résidu Laronde 70/S@2%/CP-10 min, 1h et 2h



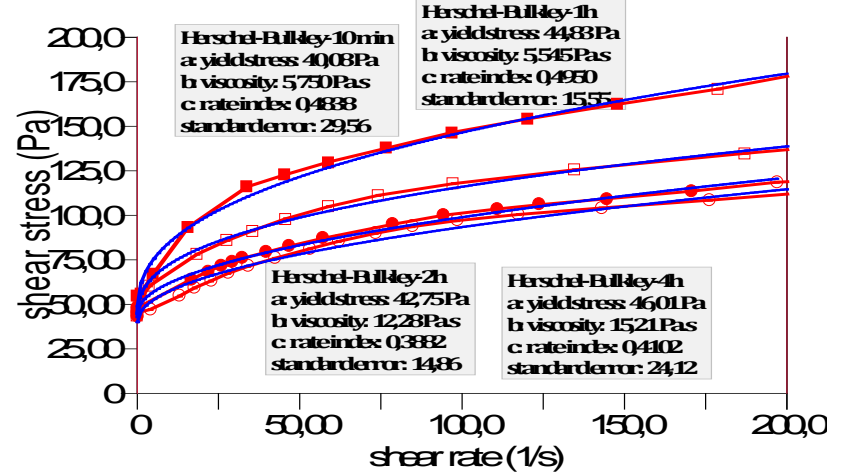
Résidu Laronde 70/S@2%/CP-10 min, 1h et 2h



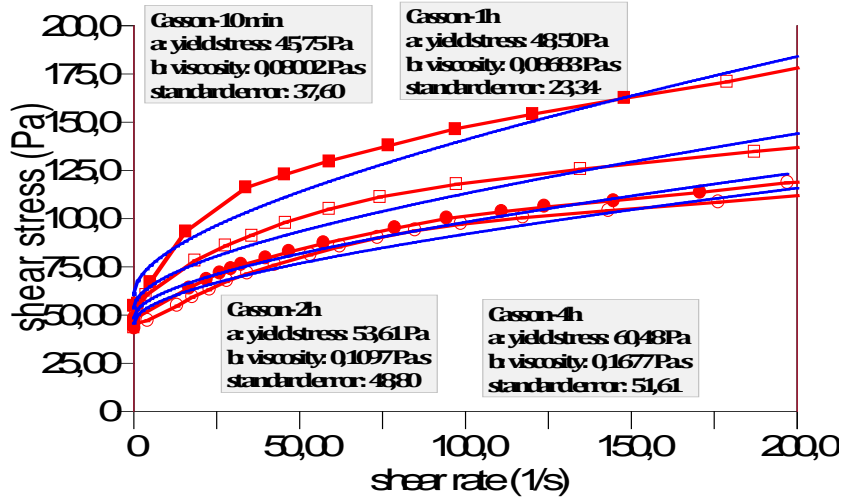
Renblai Laronde 70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



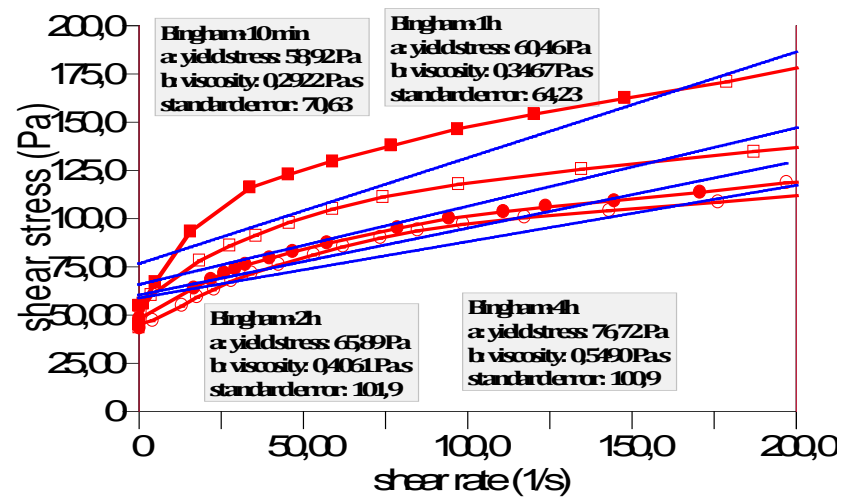
Renblai Laronde 70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



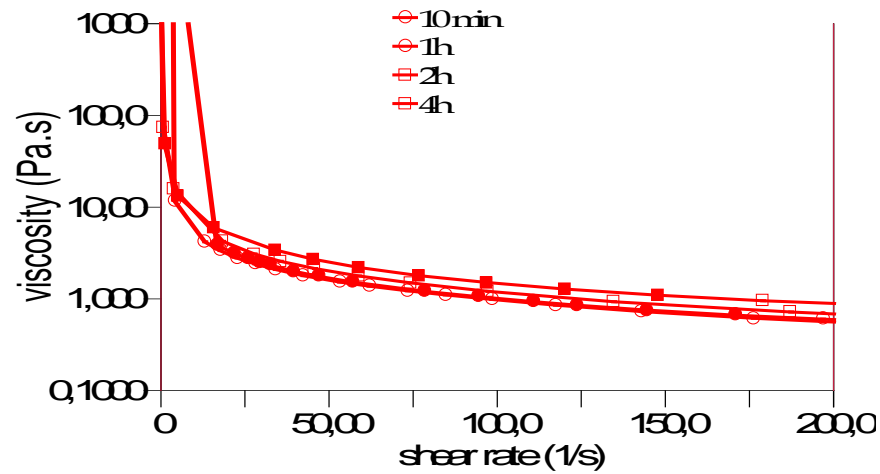
Renblai Laronde 70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



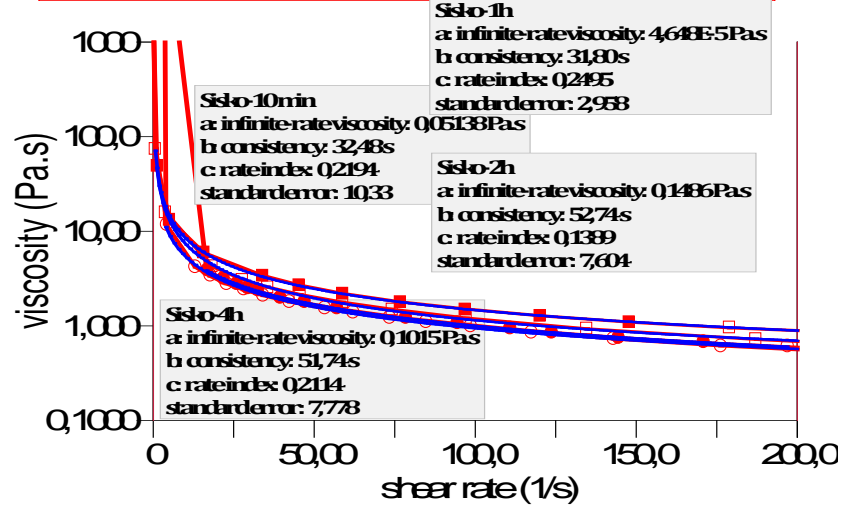
Renblai Laronde 70/S@2%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



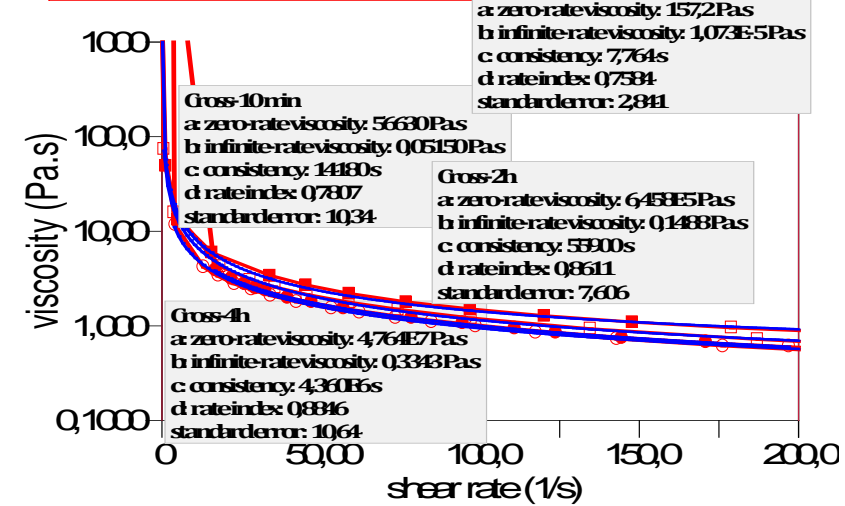
Renblai Laronde 70/S@2%CPSC-10min, 1h, 2h et 4h



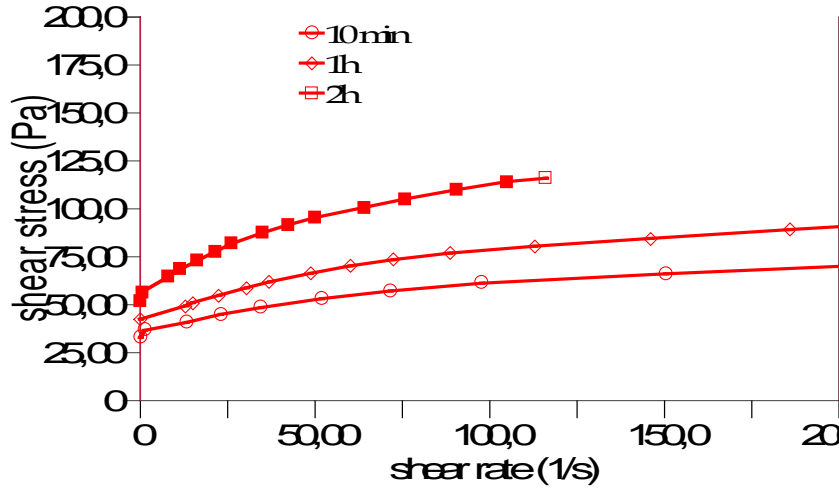
Renblai Laronde 70/S@2%CPSC-10min, 1h, 2h et 4h



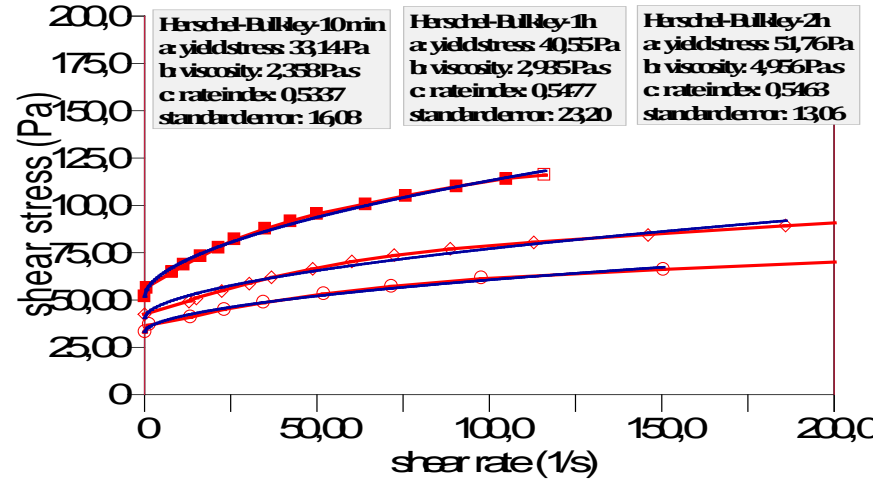
Renblai Laronde 70/S@2%CPSC



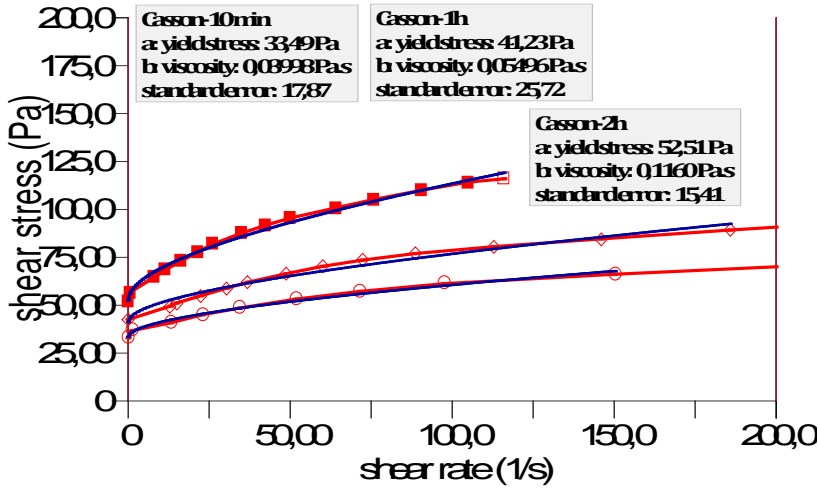
Remblai Laronde 70/S@45/CP-10min, 1h et 2h



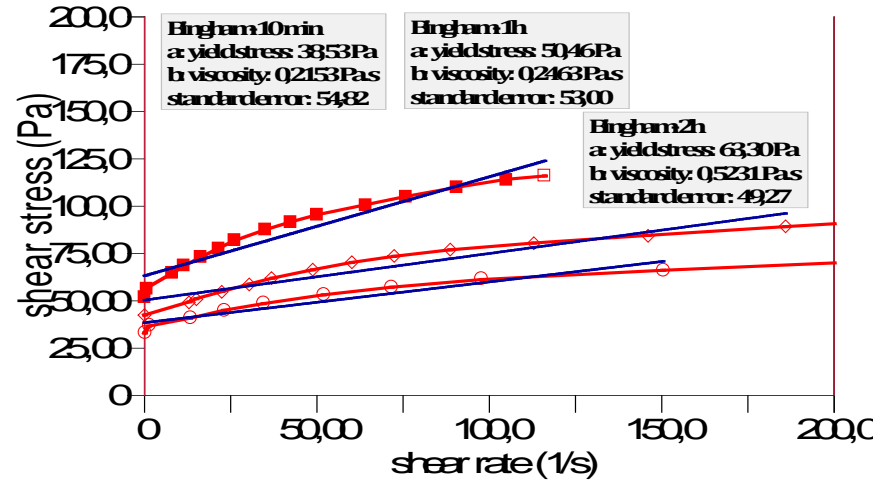
Remblai Laronde 70/S@45/CP-10min, 1h et 2h



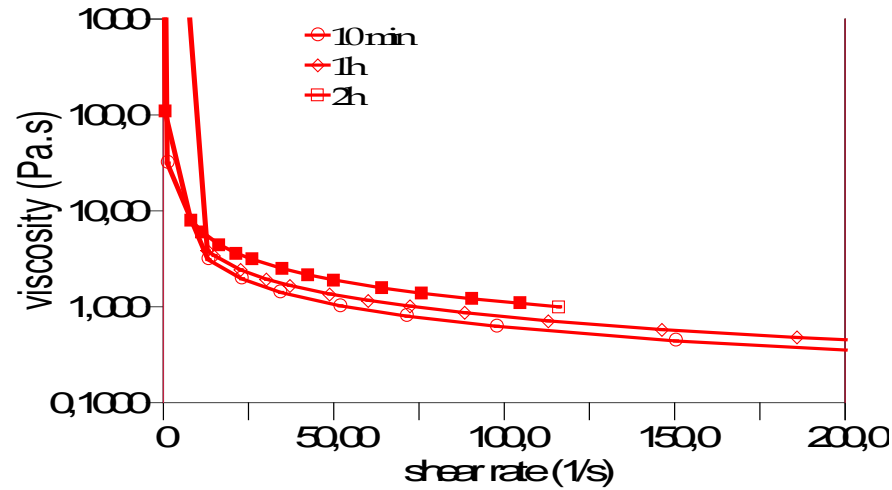
Remblai Laronde 70/S@45/CP-10min, 1h et 2h



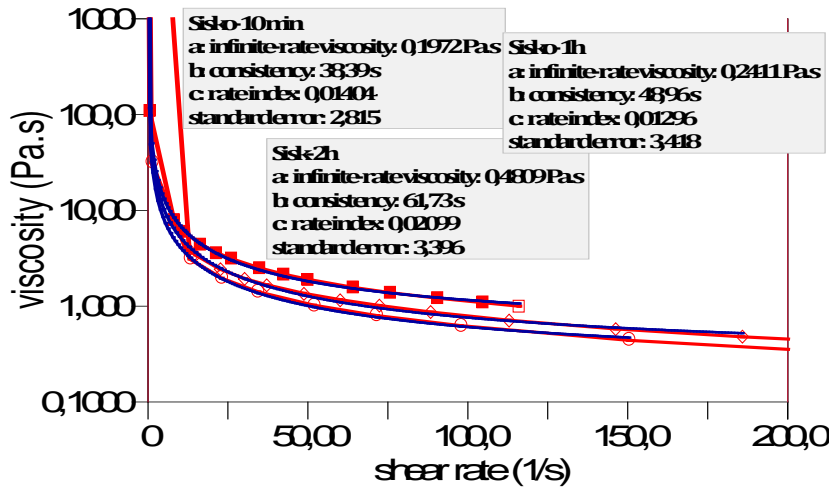
Remblai Laronde 70/S@45/CP-10min, 1h et 2h



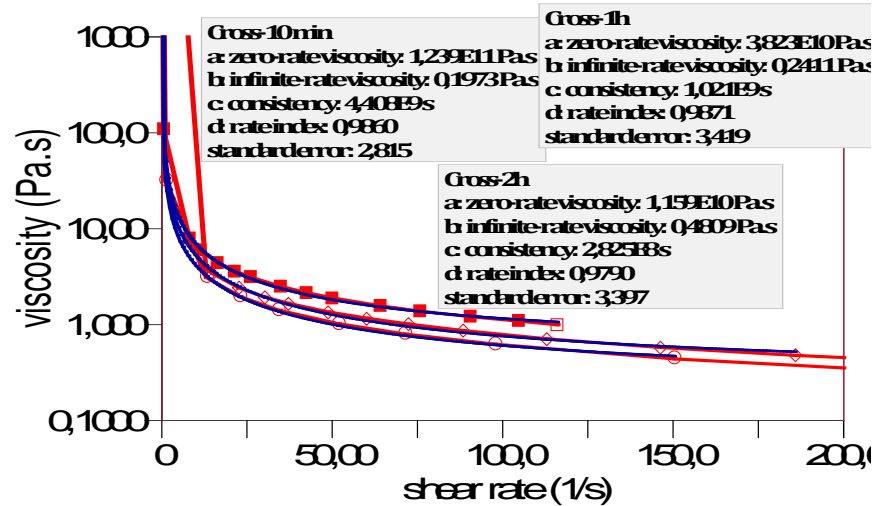
Renblai Laronde 70/S@45°/CP-10min, 1h et 2h



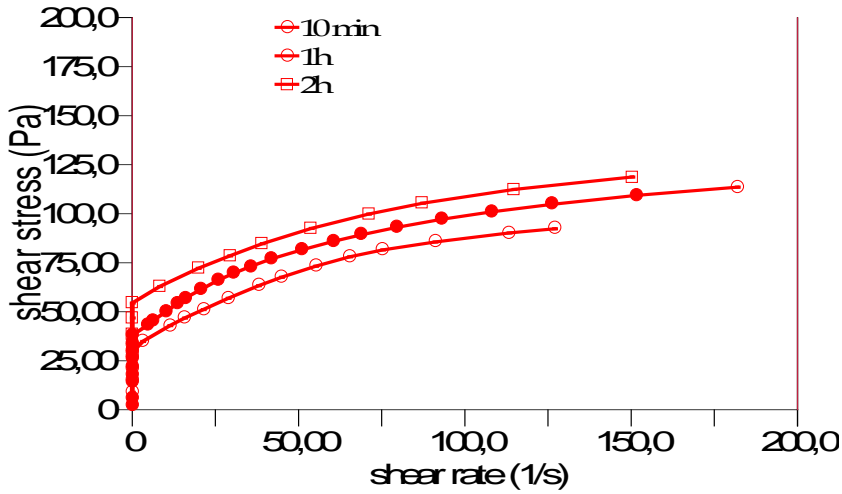
Renblai Laronde 70/S@45°/CP-10min, 1h et 2h



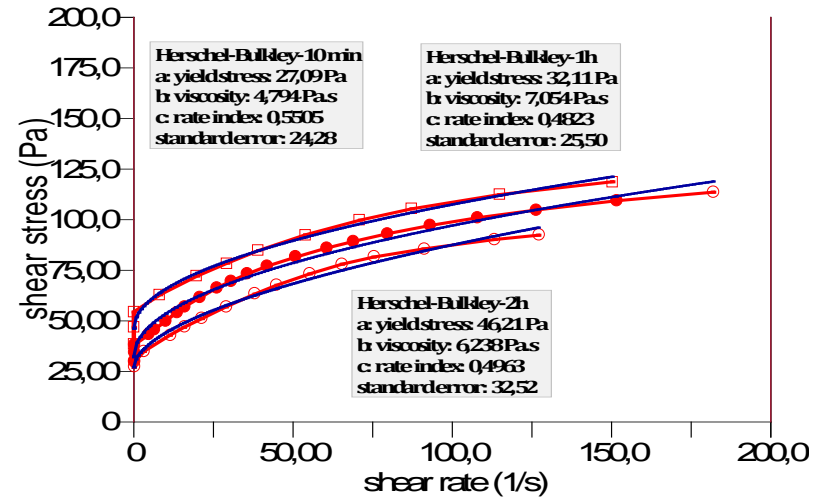
Renblai Laronde 70/S@45°/CP-10min, 1h et 2h



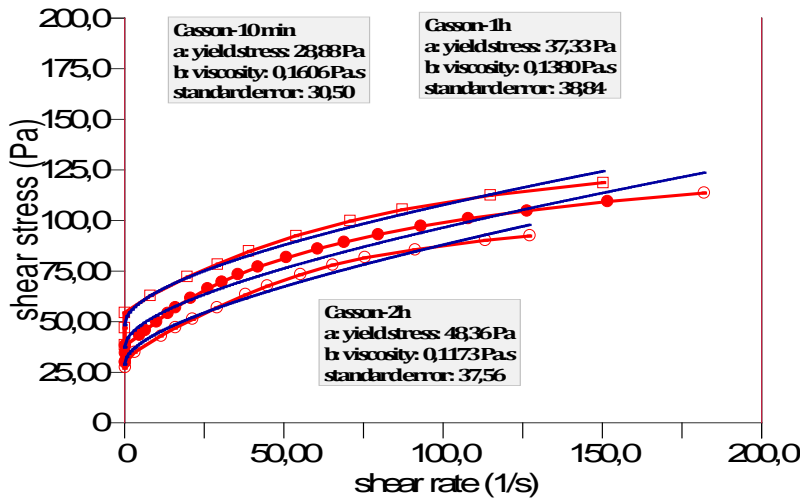
Renblai Laronde 70%S@45%CP-SG-10min, 1h, et 2h



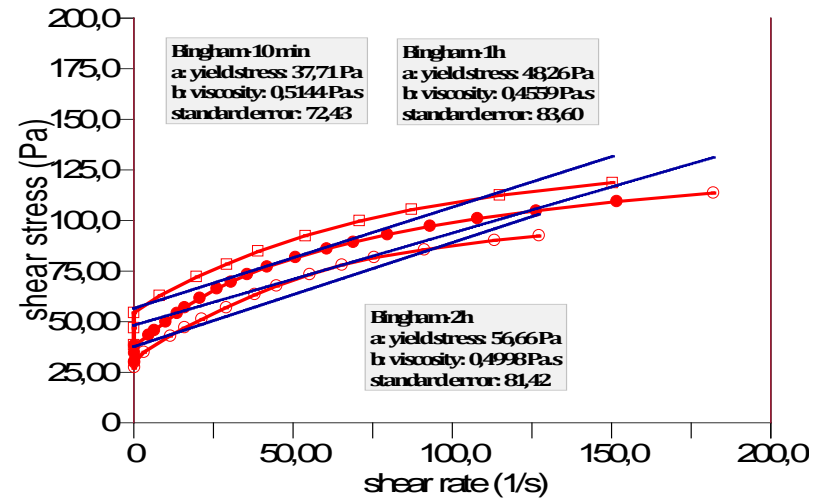
Renblai Laronde 70%S@45%CP-SG-10 min, 1h, et 2h



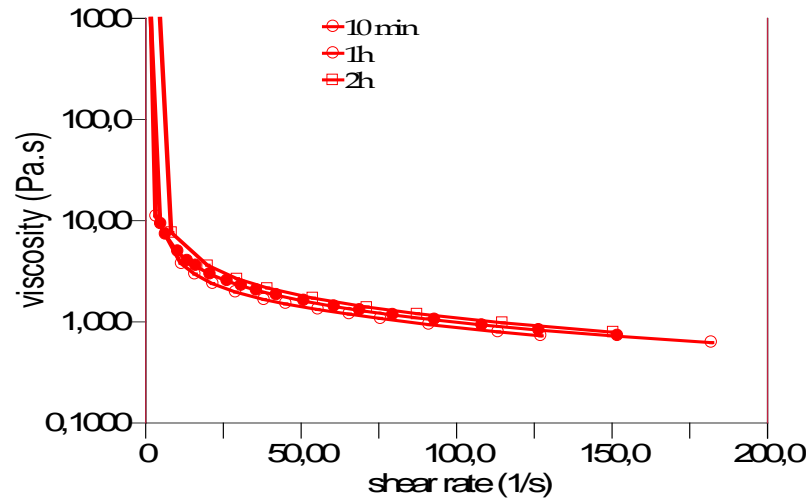
Renblai Laronde 70%S@45%CP-SG-10min, 1h, et 2h



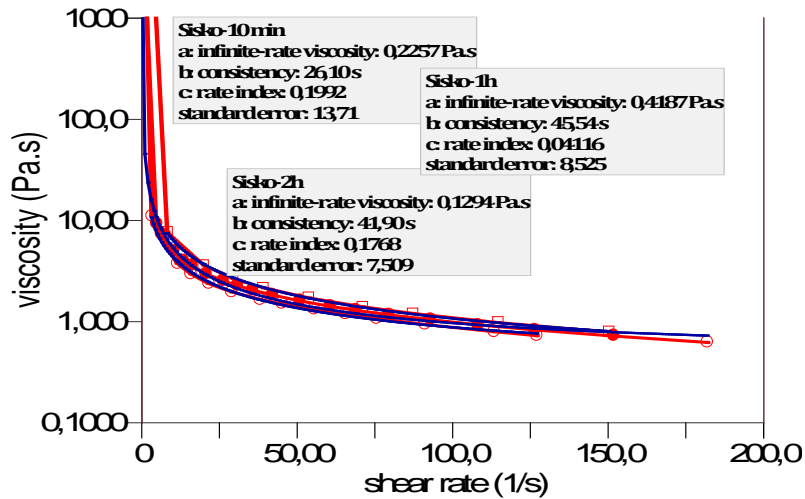
Renblai Laronde 70%S@45%CP-SG-10 min, 1h, et 2h



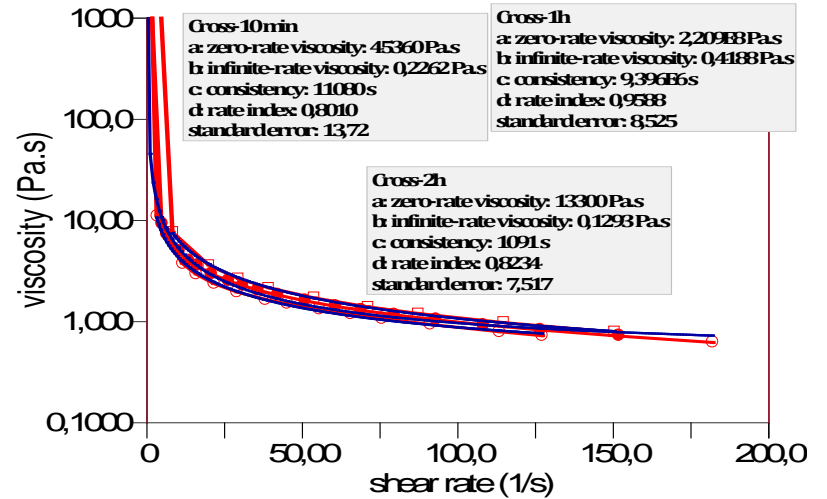
Remblai Laronde 70%/S@45%CP-SG-10 min, 1h, et 2h



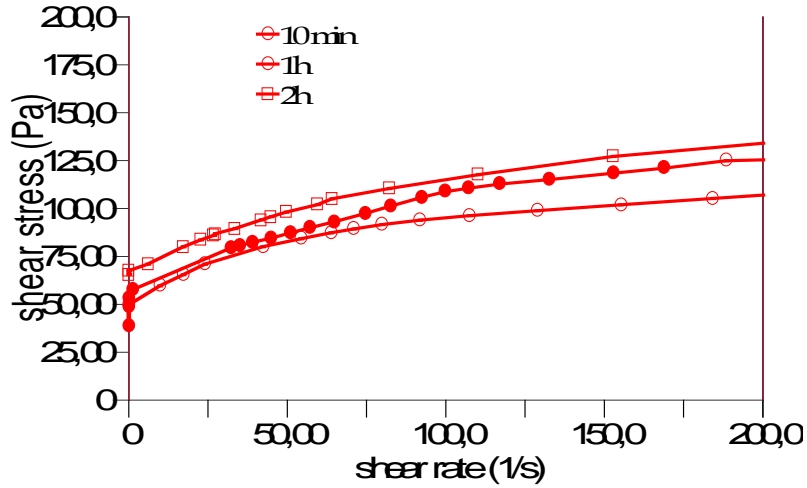
Remblai Laronde 70%/S@45%CP-SG-10 min, 1h, et 2h



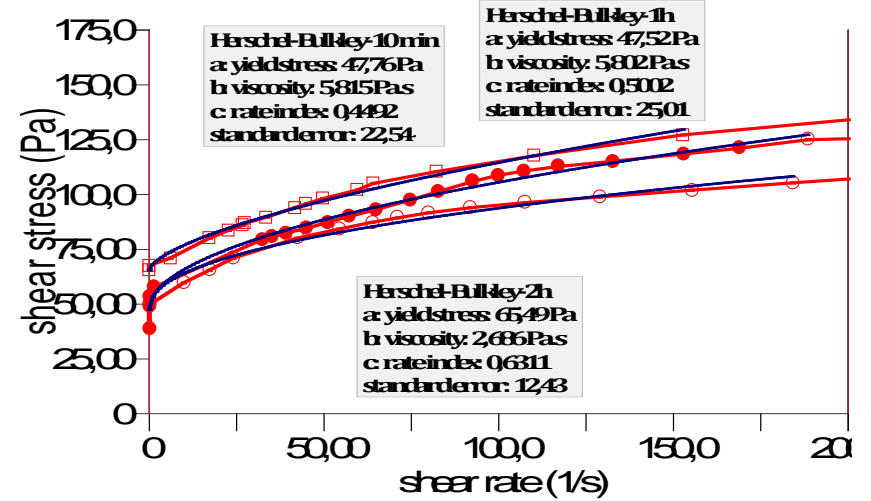
Remblai Laronde 70%/S@45%CP-SG-10 min, 1h, et 2h



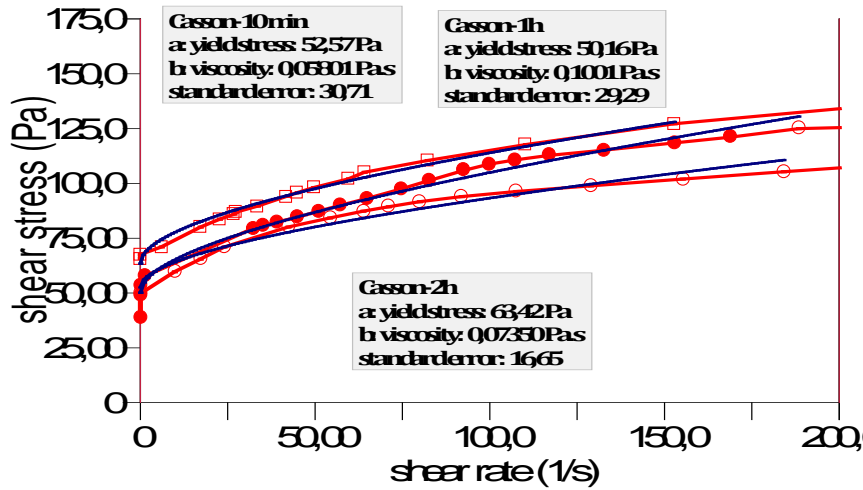
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



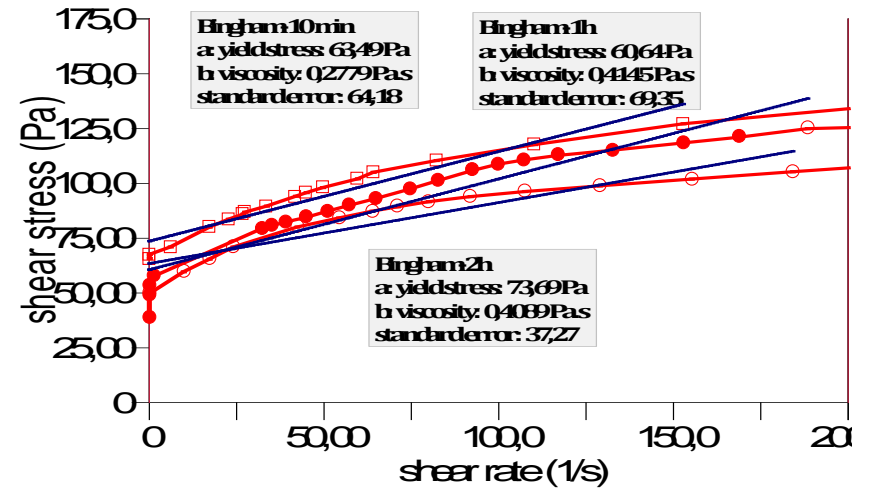
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



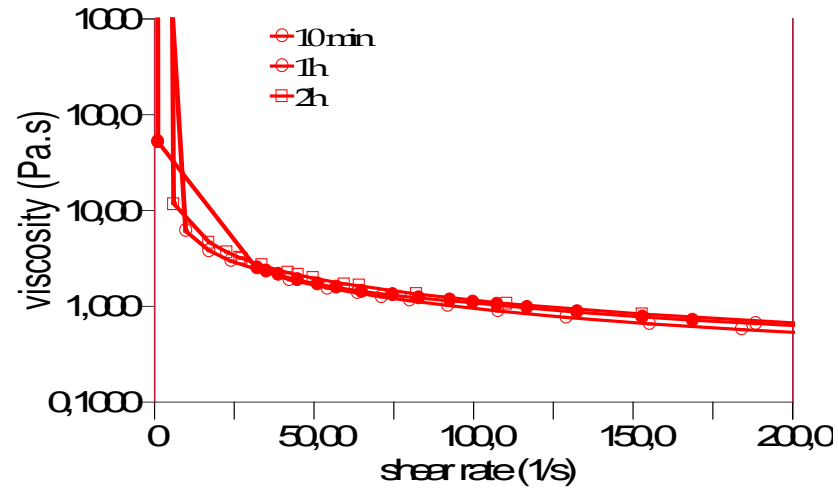
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



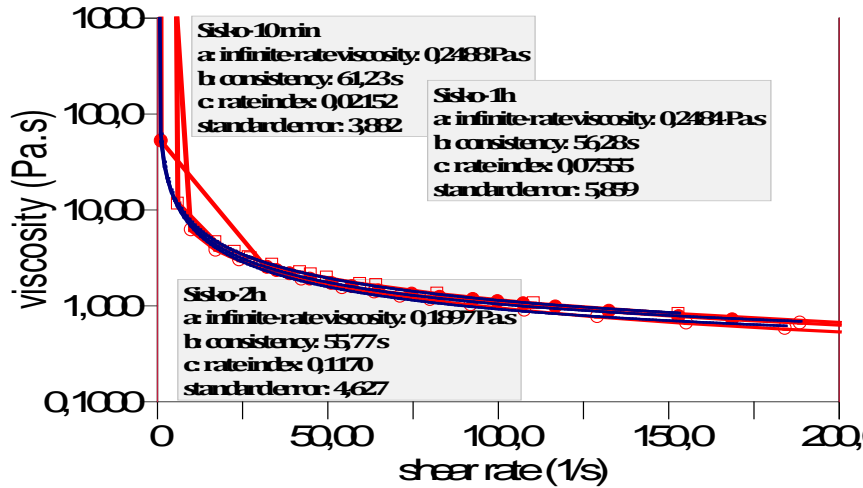
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



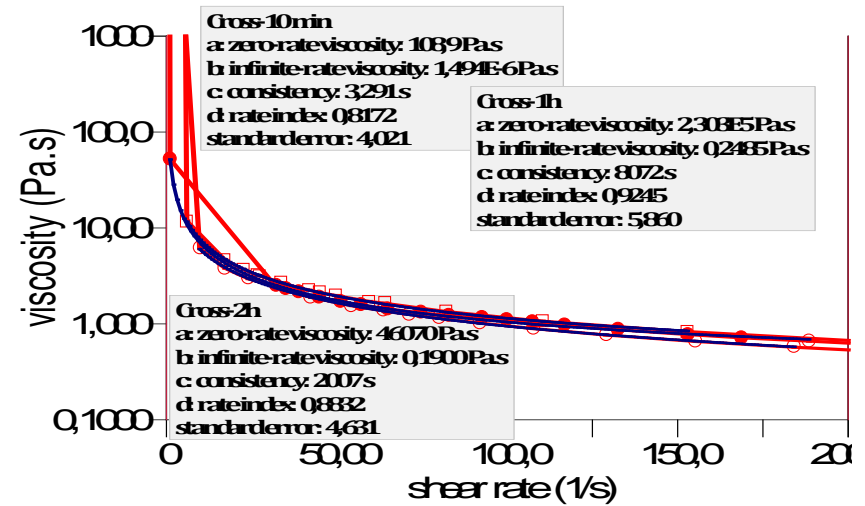
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



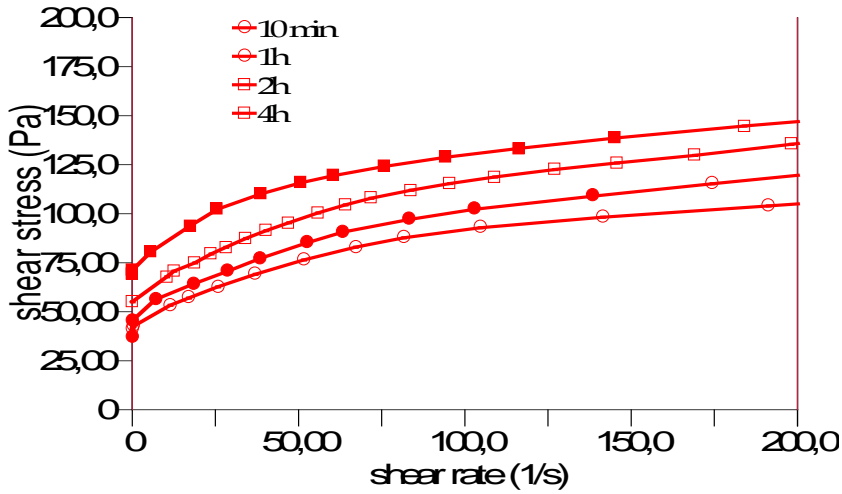
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



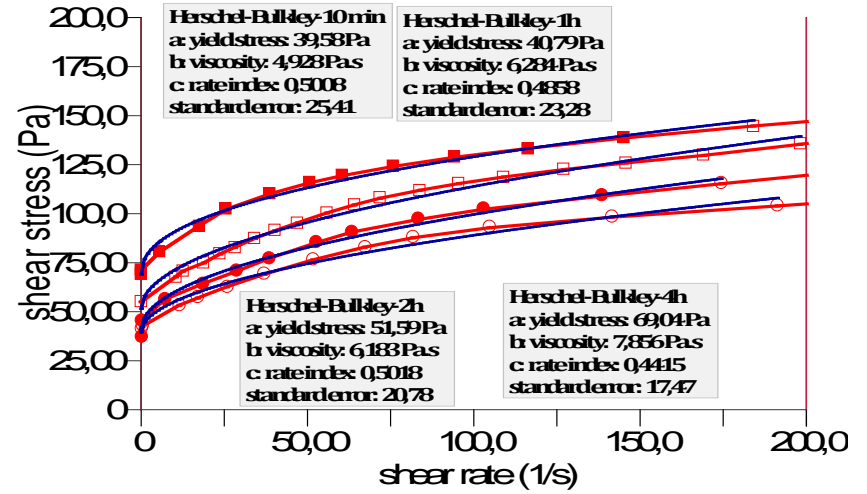
Rentlai Laronde 70/S@6/CP-10min, 1h, et 2h



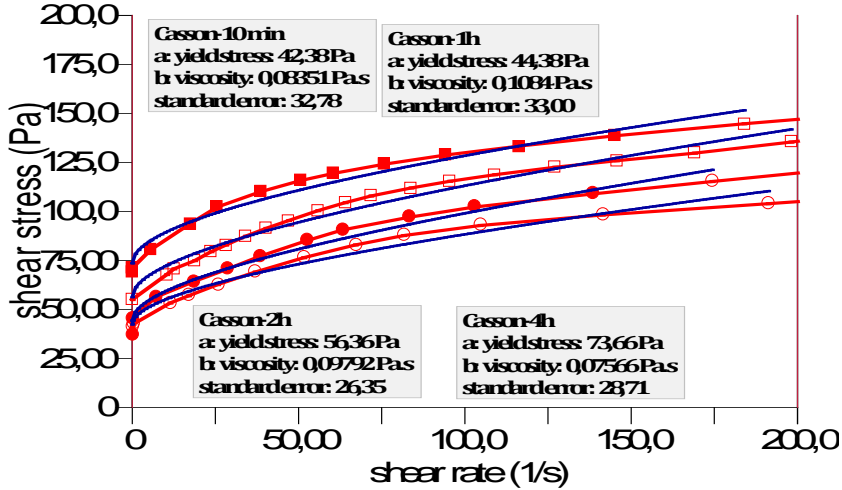
Renblai Laronde 70%/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



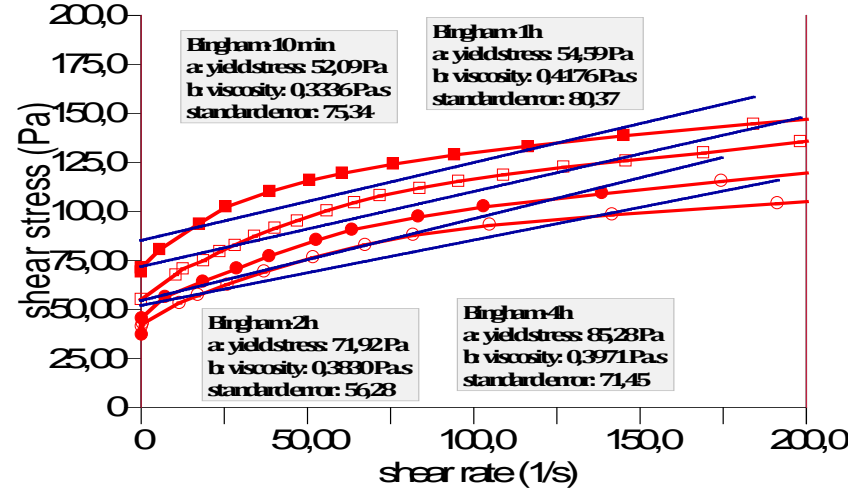
Renblai Laronde 70%/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



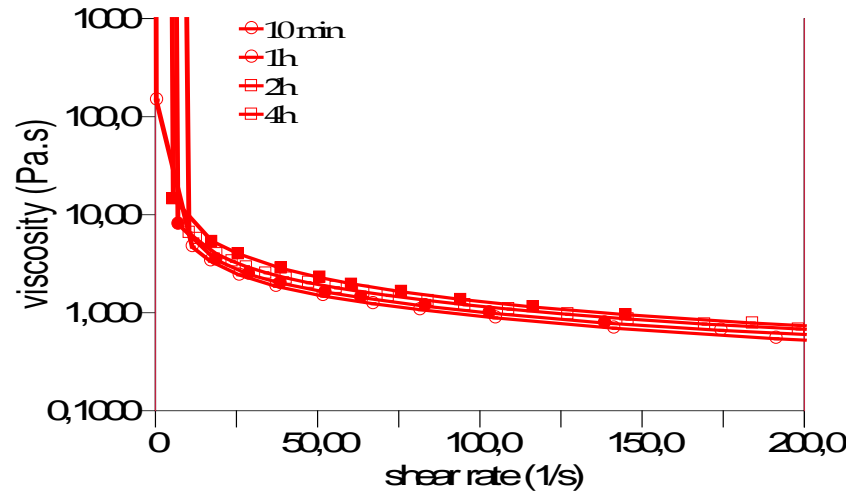
Renblai Laronde 70%/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



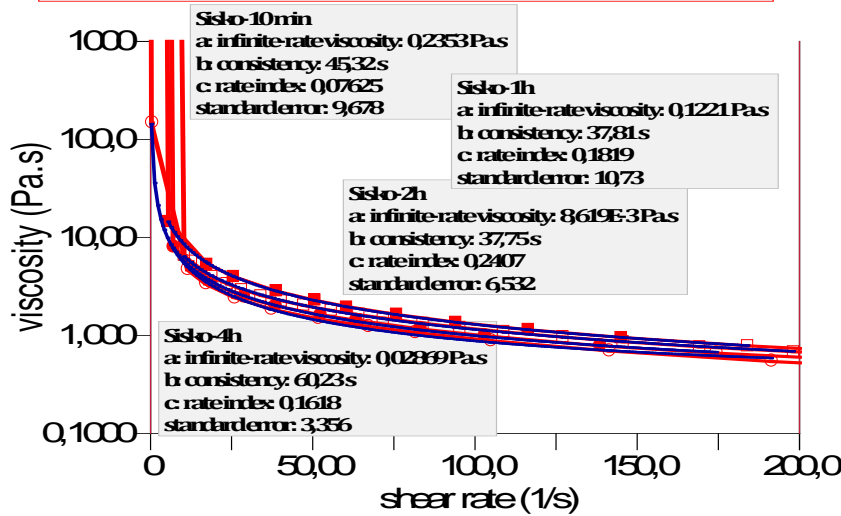
Renblai Laronde 70%/S@6%/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



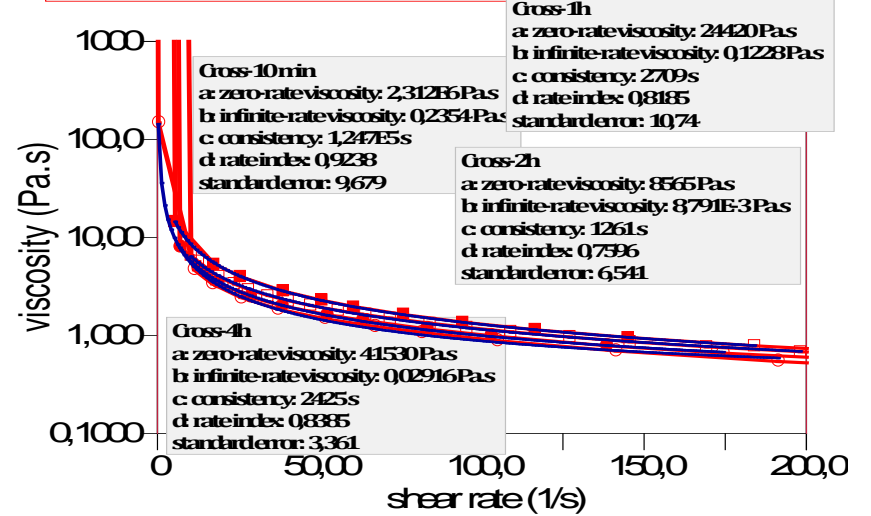
Renblai Laronde 70/S@6/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



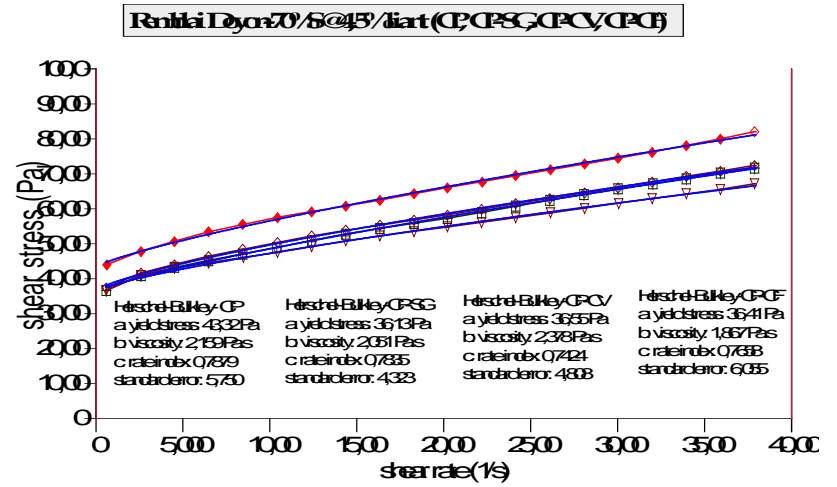
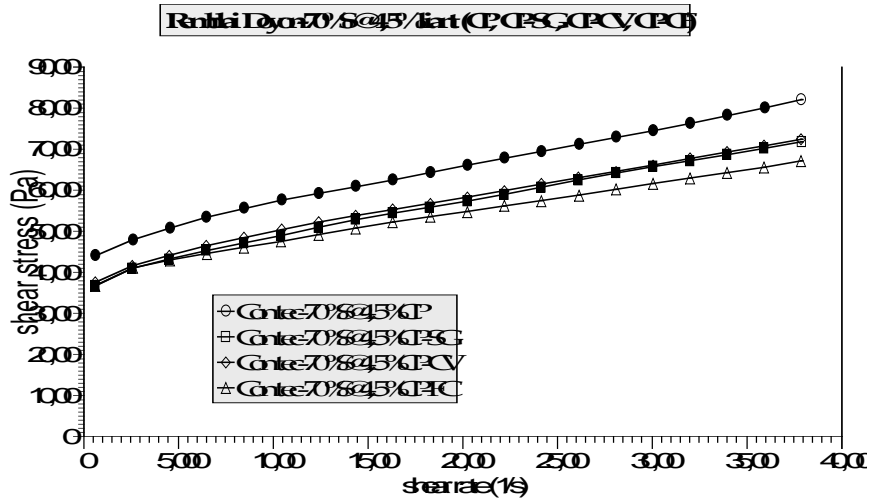
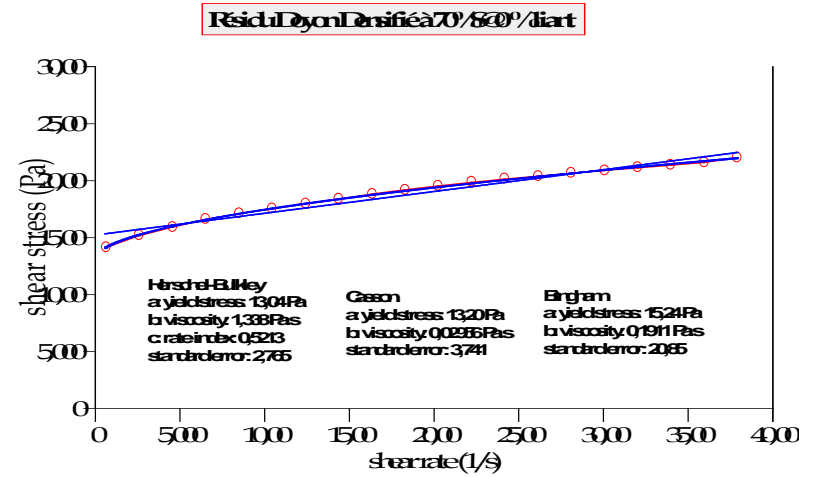
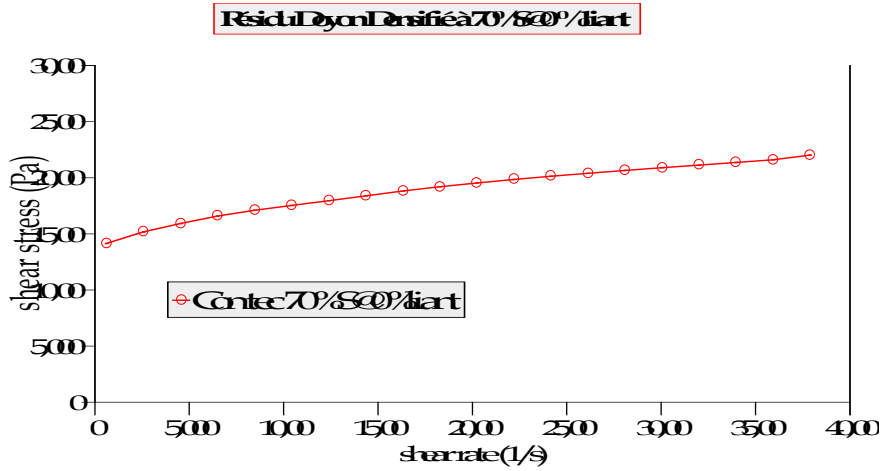
Renblai Laronde 70/S@6/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



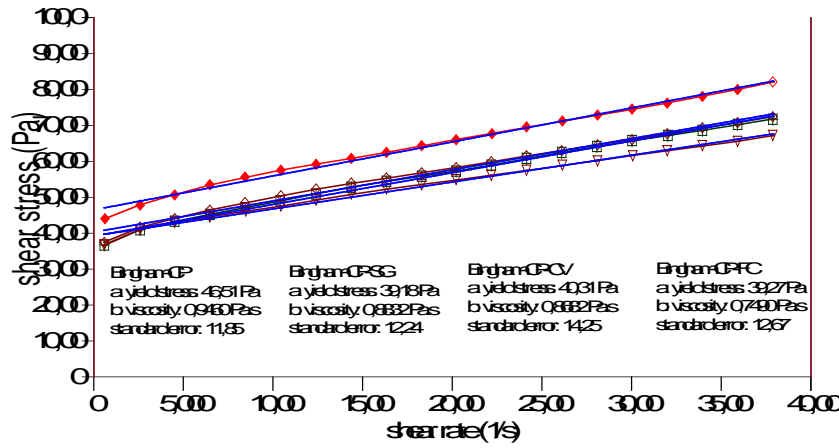
Renblai Laronde 70/S@6/CP-SG-10min, 1h, 2h et 4h



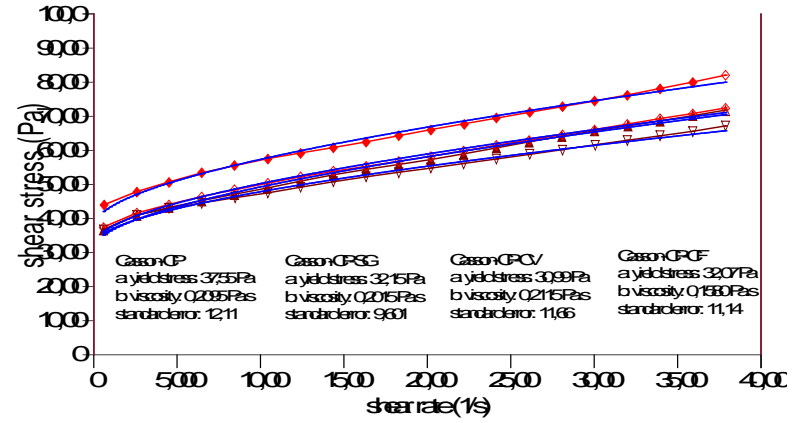
Résultats des ajustements des différentes courbes d'écoulement à 70%S@4,5% liant (CP, CP-SG, CP-CV, CP-FC)



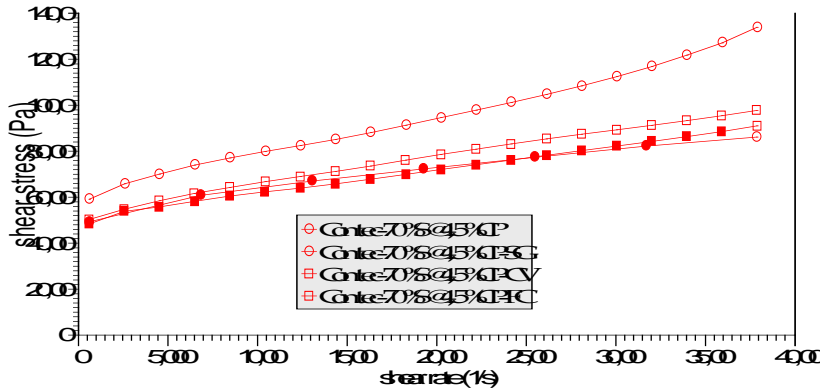
Renkli Dyon70/S@45/liat (CP,CPSG,CPV,CPIC)



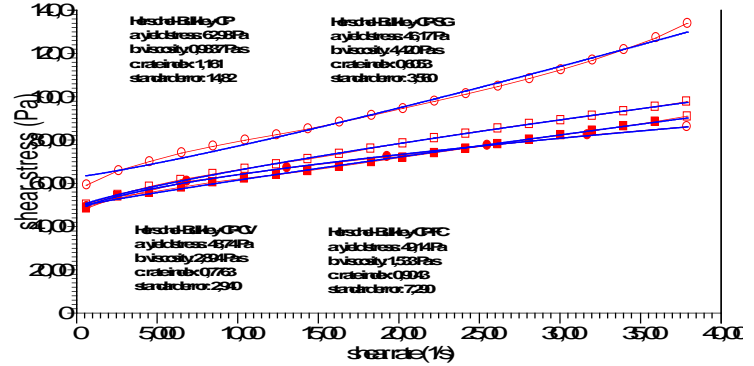
Renkli Dyon70/S@45/liat (CP,CPSG,CPV,CPIC)

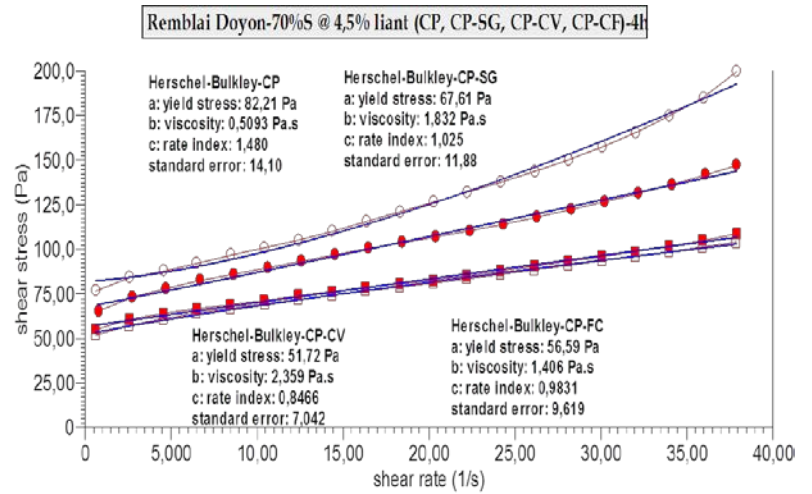
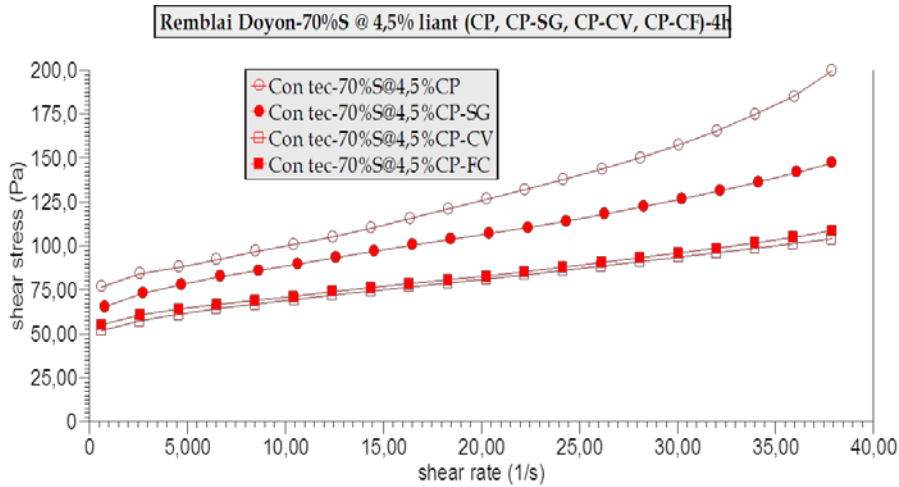
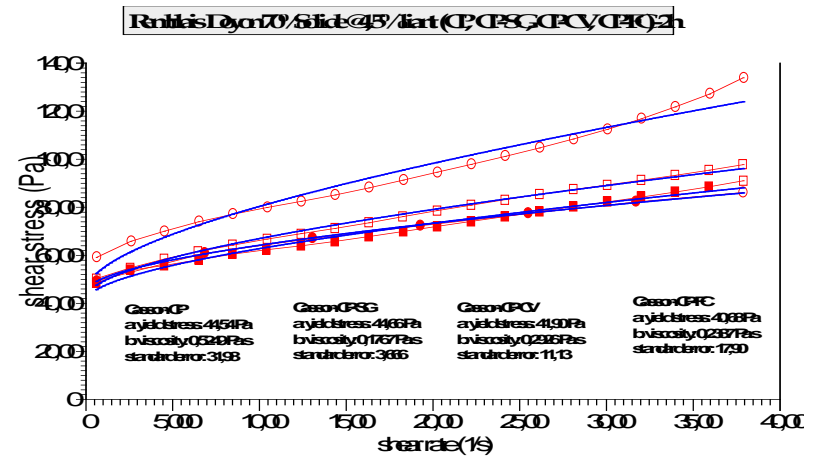
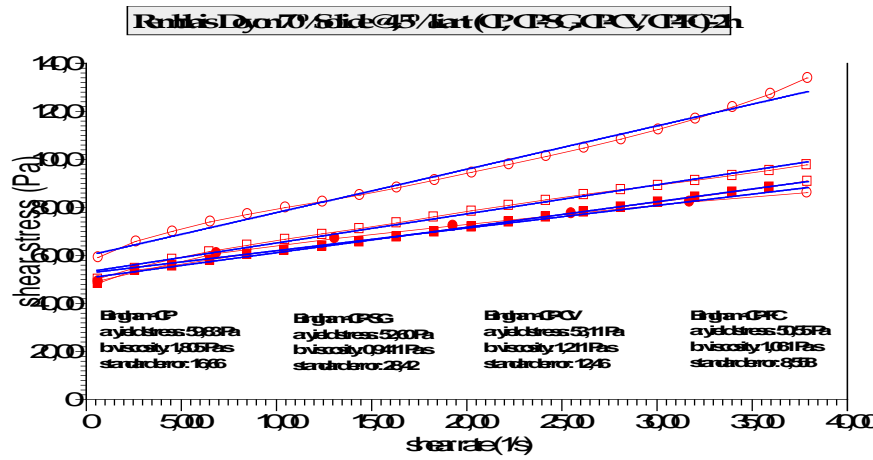


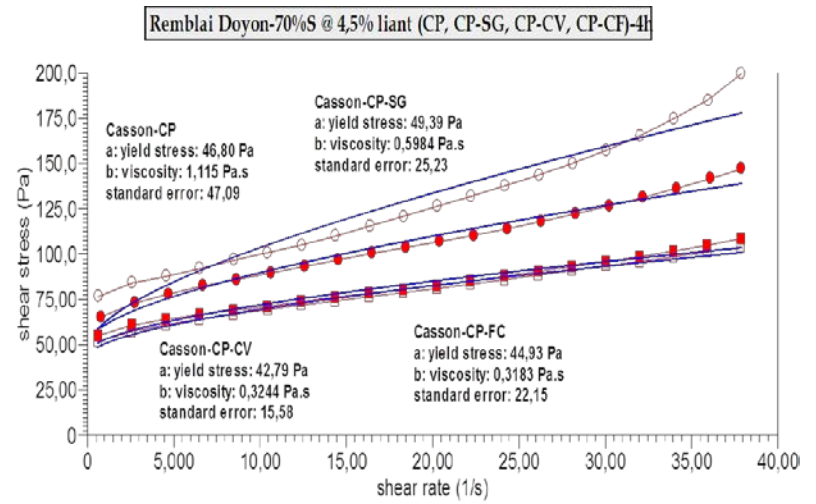
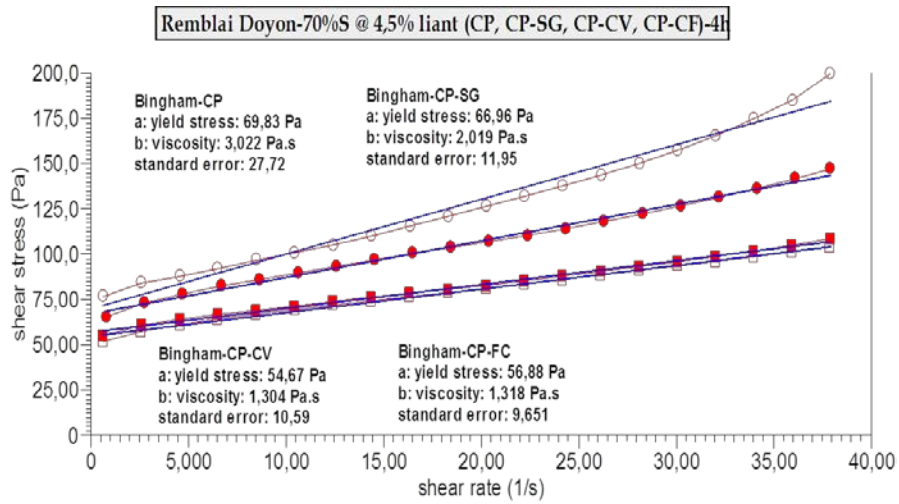
Renkli Dyon70/S@45/liat (CP,CPSG,CPV,CPIC)2h

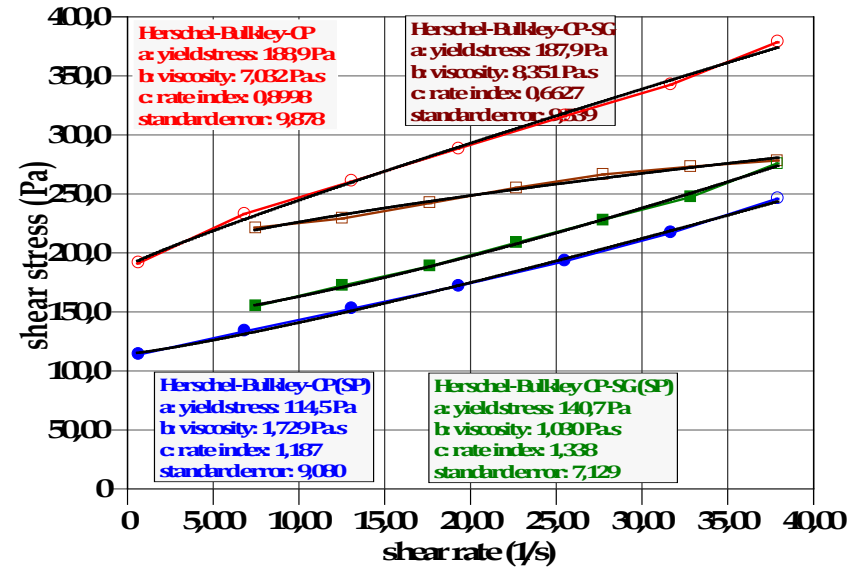
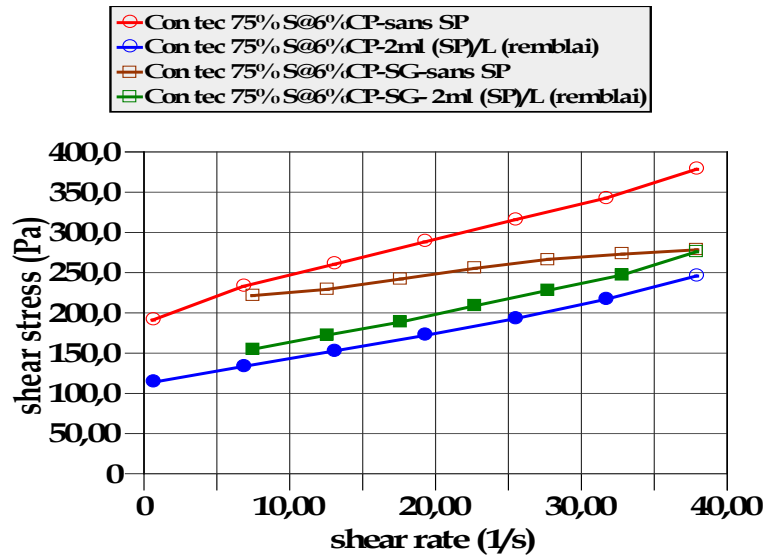


Renkli Dyon70/S@45/liat (CP,CPSG,CPV,CPIC)2h

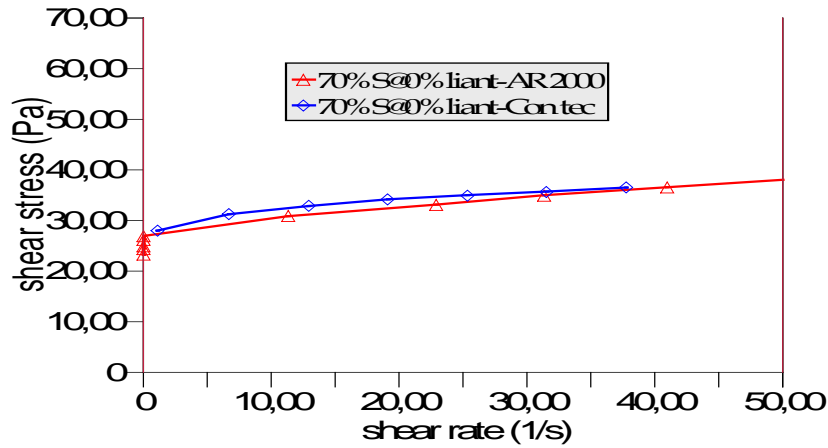




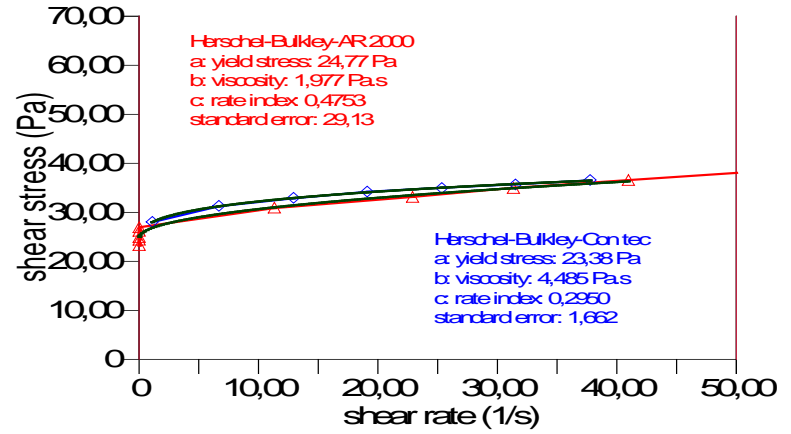




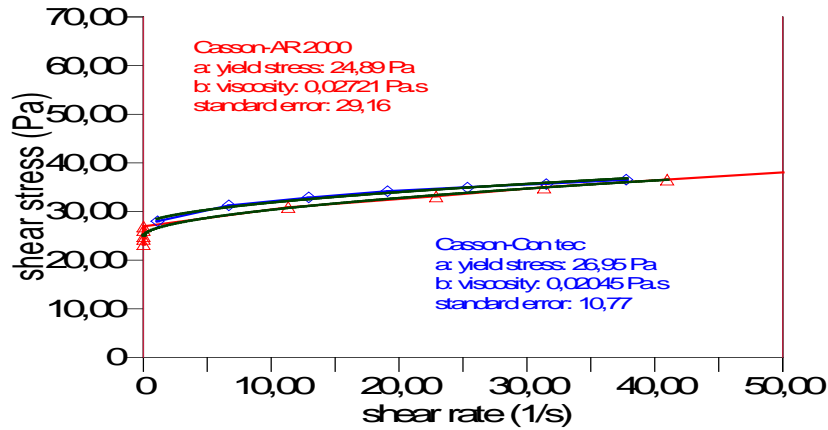
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



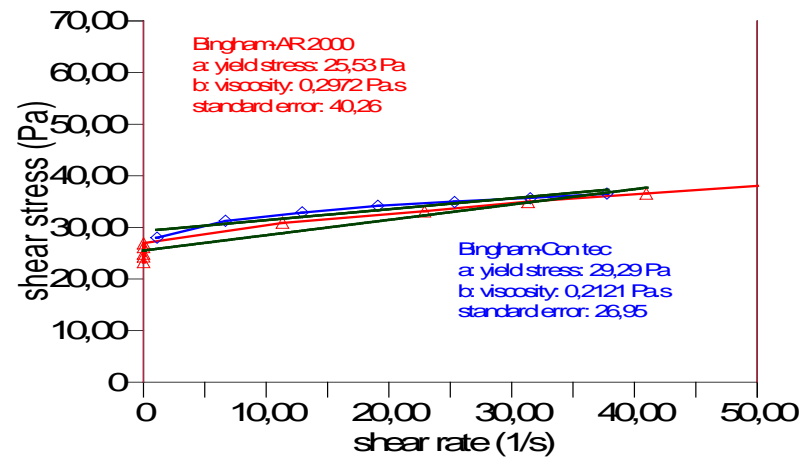
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



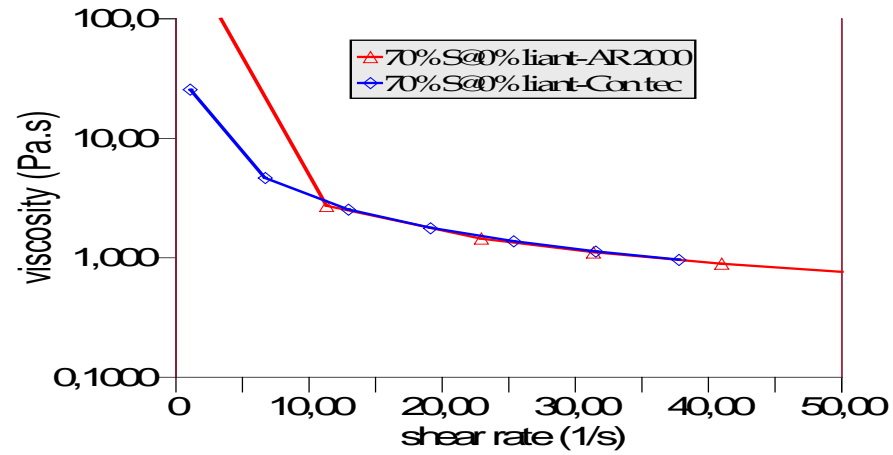
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



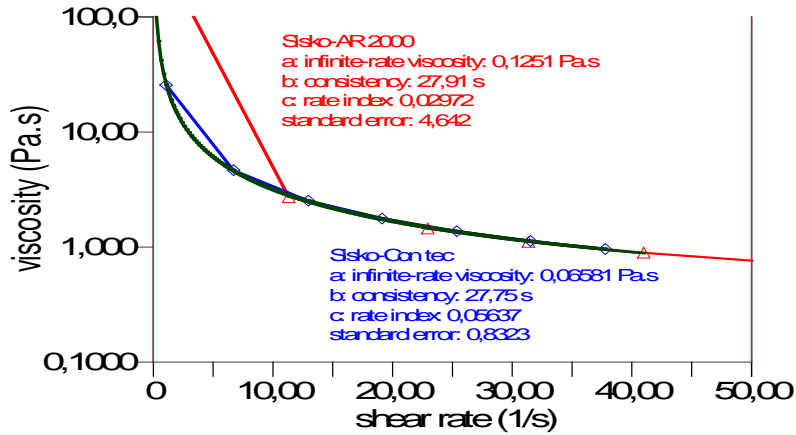
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



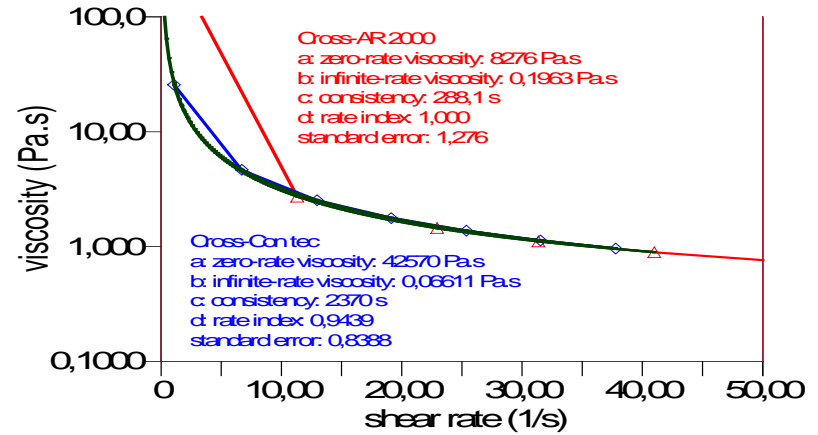
Courbe de viscosité du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



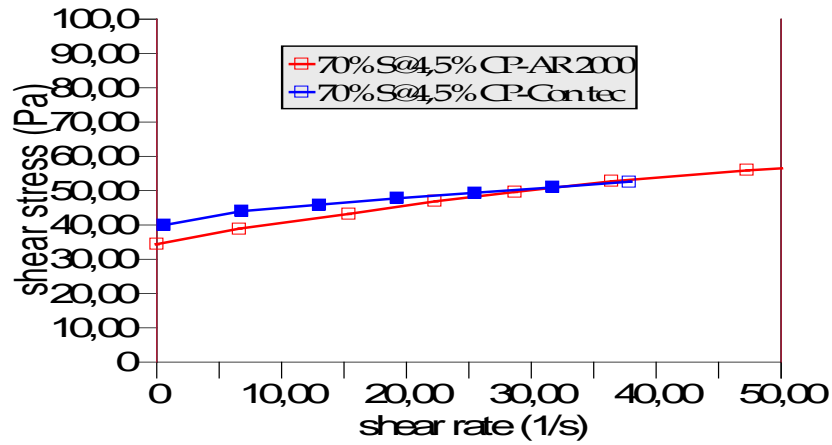
Courbe de viscosité du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



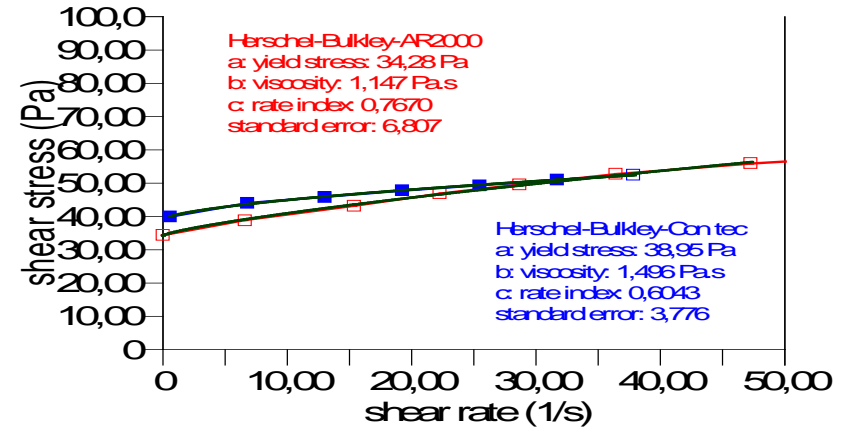
Courbe de viscosité du résidu Laronde épaissi à 70% S@0% liant



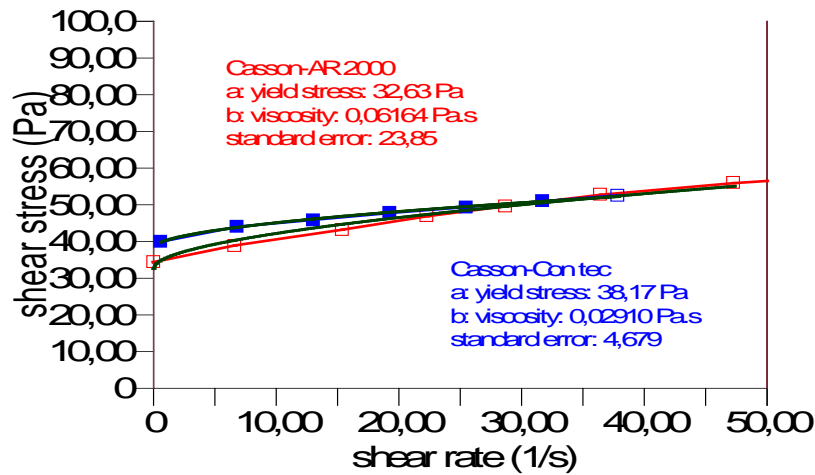
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP



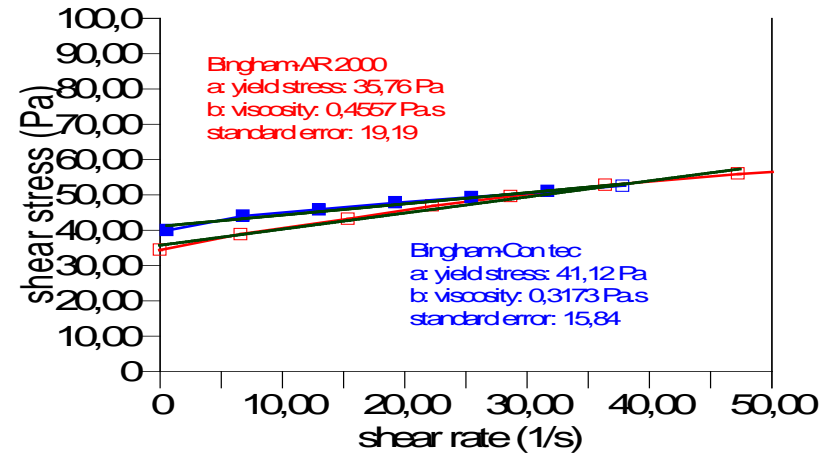
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP

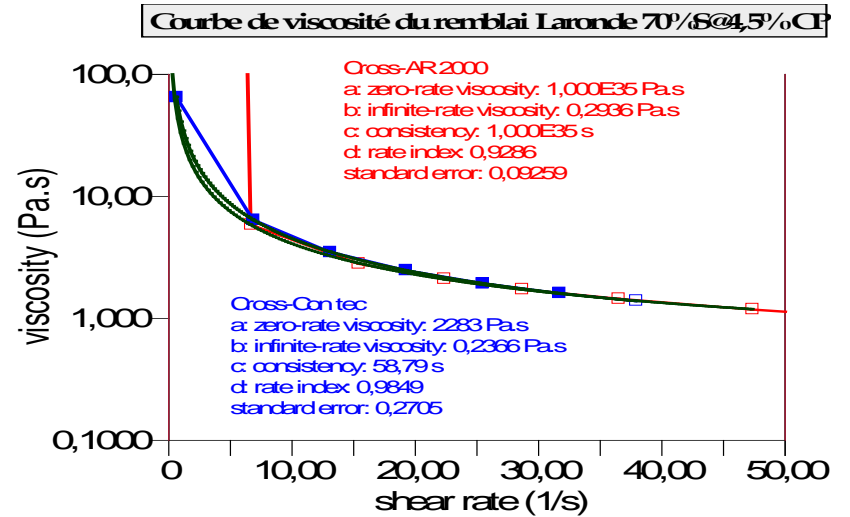
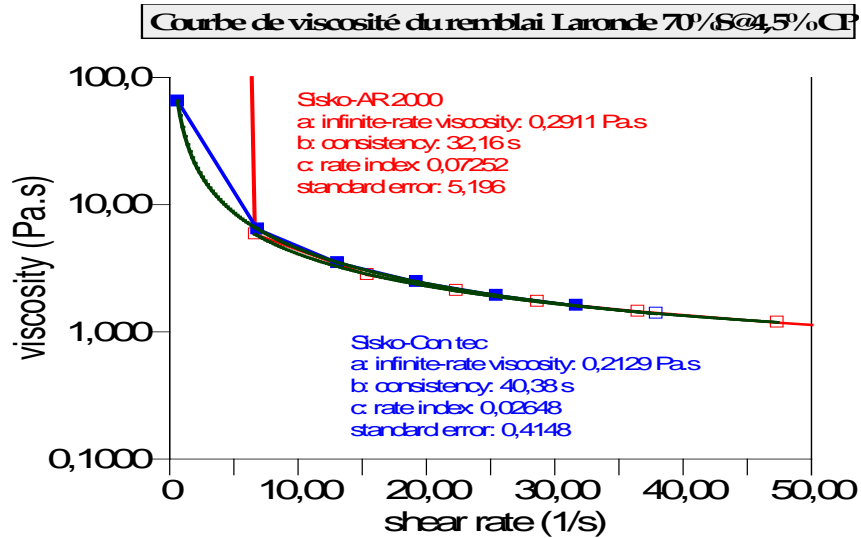
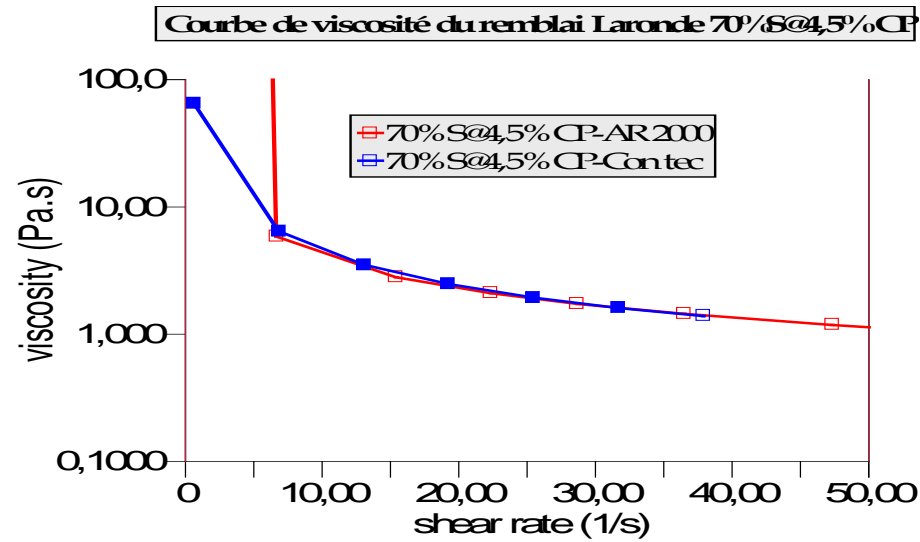


Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP



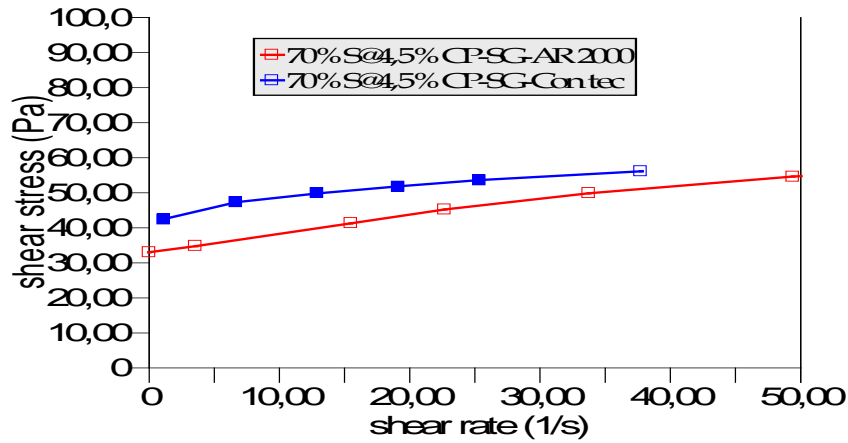
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP



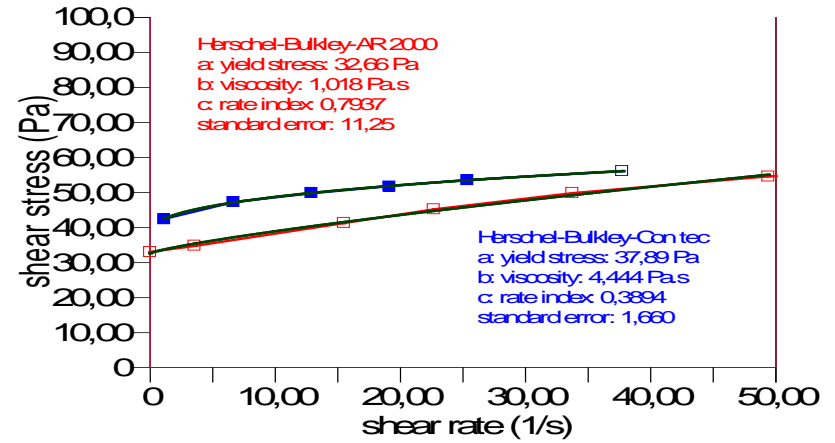


Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareils sur le remblai Laronde à 70% Solide@4,5% CP

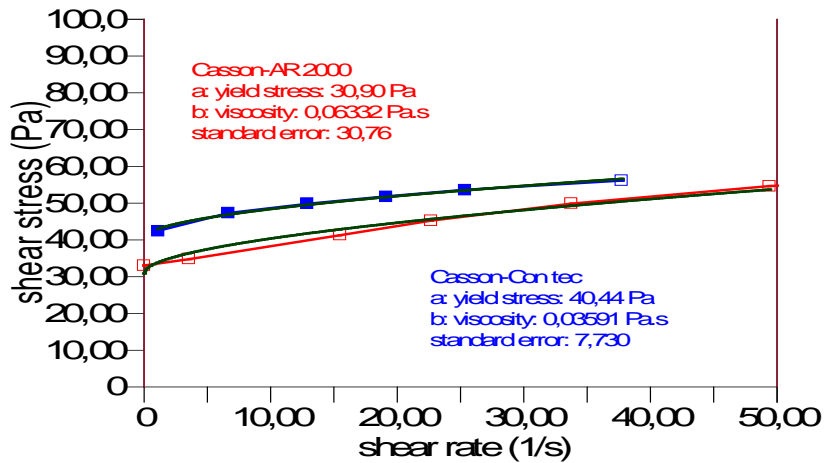
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP-SG



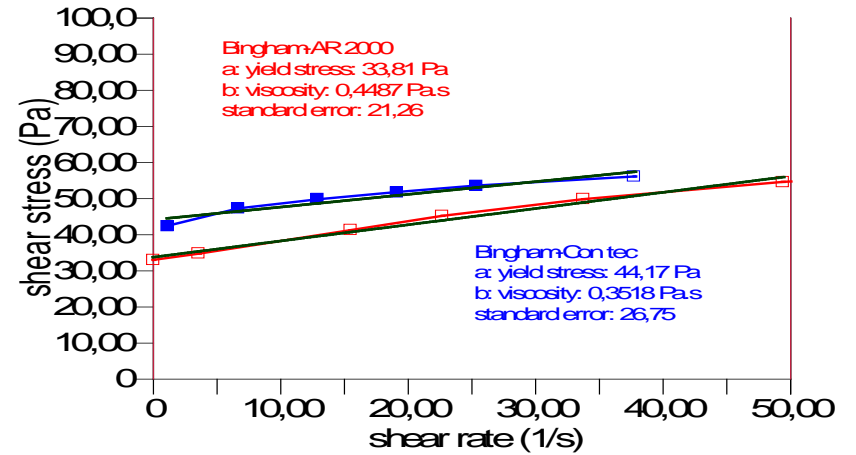
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP-SG



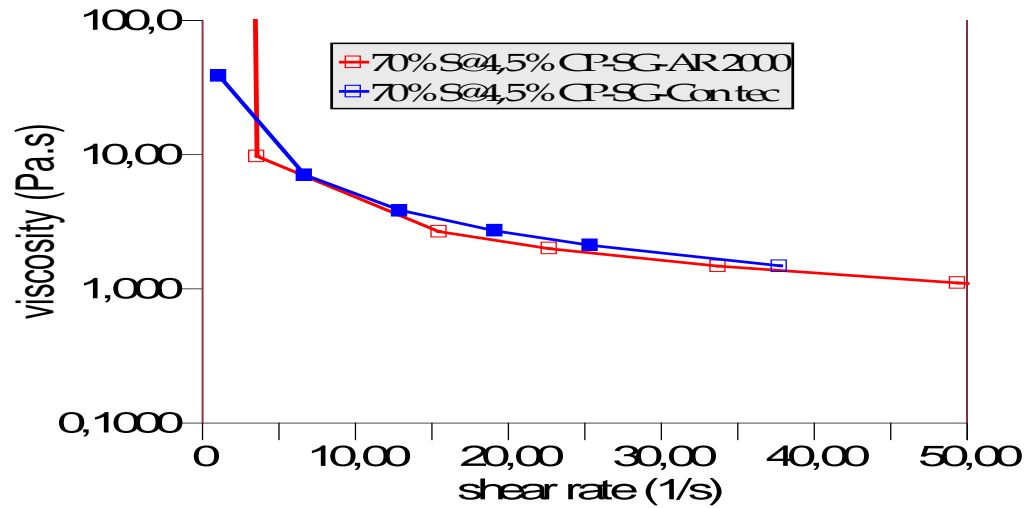
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP-SG



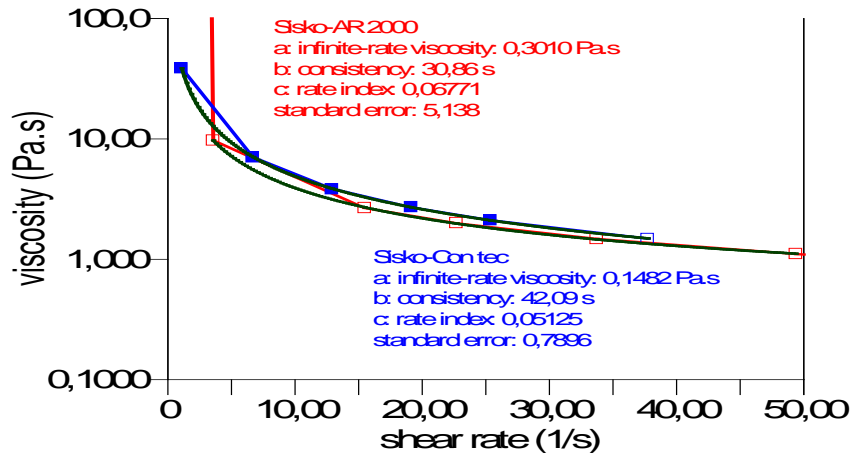
Courbe d'écoulement du remblai Laronde 70%S@4,5%CP-SG



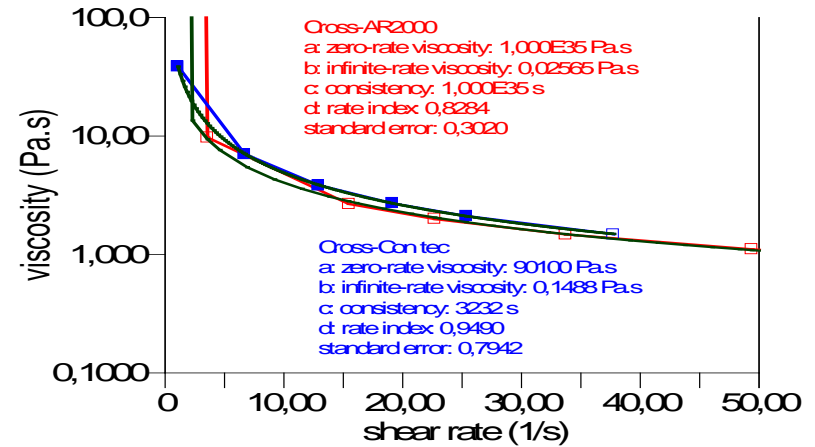
Courbe de viscosité du remblai Laronde 70% S@4,5% CP-SG



Courbe de viscosité du remblai Laronde 70% S@4,5% CP-SG

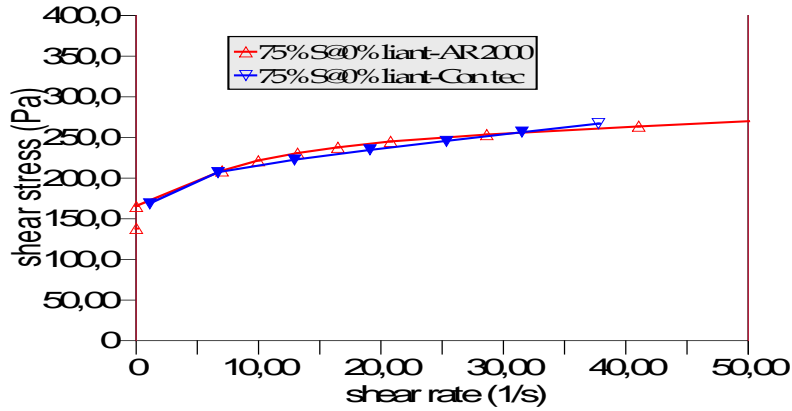


Courbe de viscosité du remblai Laronde 70% S@4,5% CP-SG

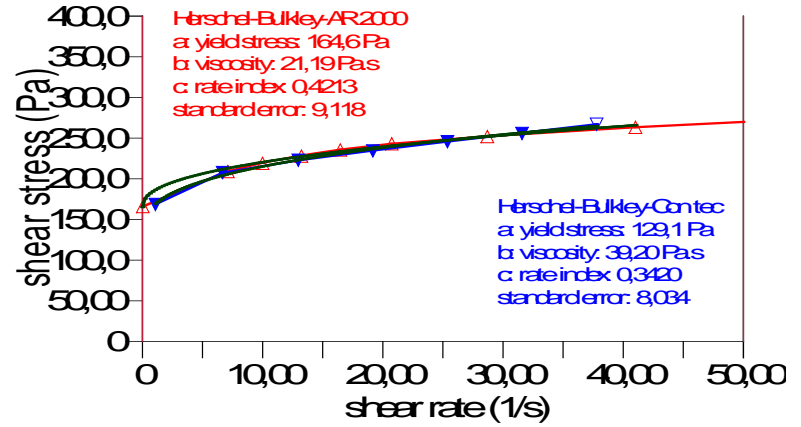


Comparaison des résultats obtenus avec les deux types d'appareils sur le remblai Laronde à 70% Solide@4,5% CP-SG.

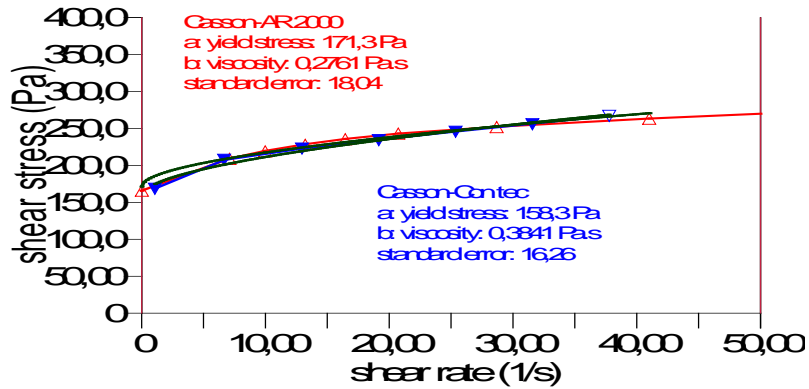
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 75%/80% liant



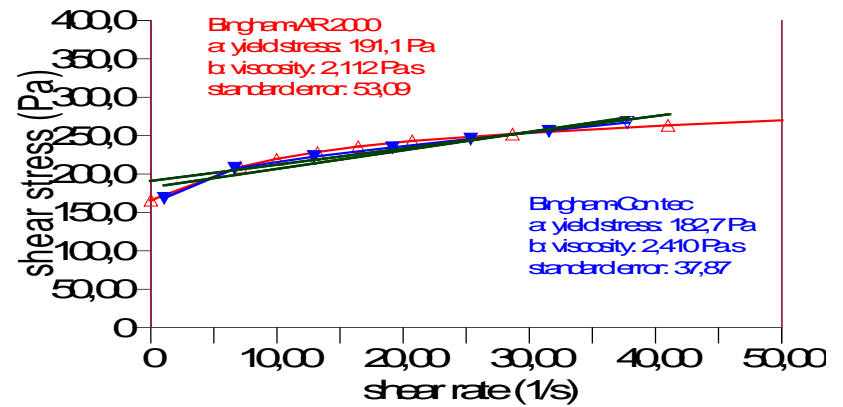
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 75%/80% liant



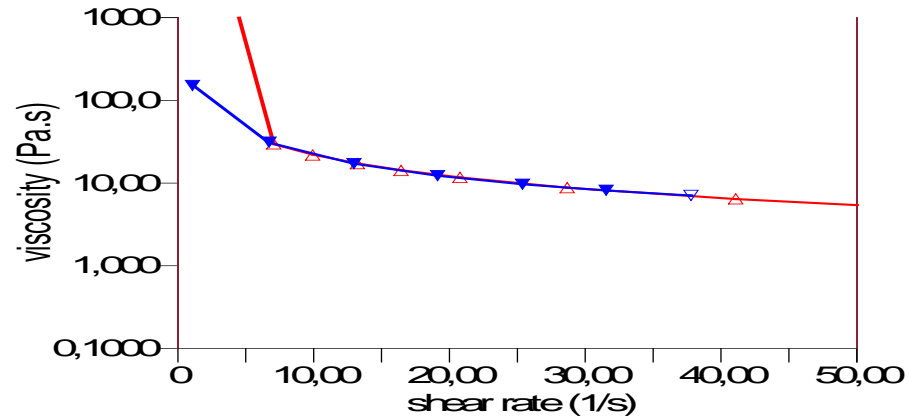
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 75%/80% liant



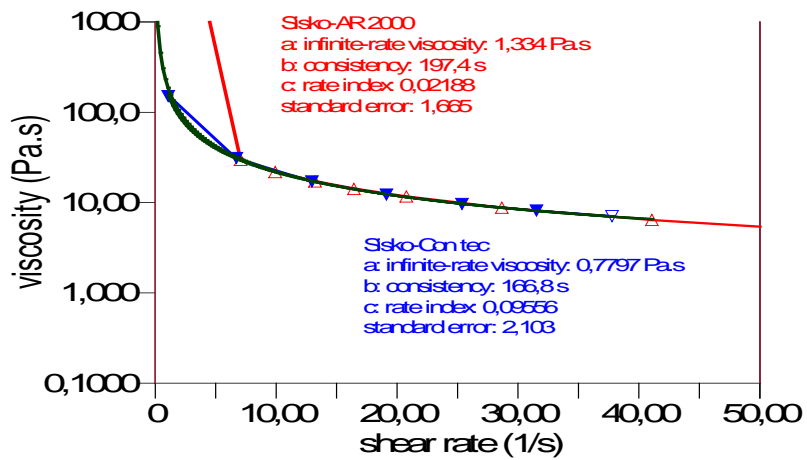
Courbe d'écoulement du résidu Laronde épaissi à 75%/80% liant



Courbe de viscosité du résidu Laronde épaissi à 75% S@0% liant



Courbe de viscosité du résidu Laronde épaissi à 75% S@0% liant



Courbe de viscosité du résidu Laronde épaissi à 75% S@0% liant

