



HAL
open science

**Ecoulements à surface libre de fluides à seuil :
rhéométrie et validation des caractéristiques
hydrauliques dans un canal à fond mobile. Application
aux laves torrentielles**

Assia Ghemmour

► **To cite this version:**

Assia Ghemmour. Ecoulements à surface libre de fluides à seuil : rhéométrie et validation des caractéristiques hydrauliques dans un canal à fond mobile. Application aux laves torrentielles. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENI060 . tel-00721734

HAL Id: tel-00721734

<https://theses.hal.science/tel-00721734>

Submitted on 30 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Mécanique des fluides, procédés, énergétique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

« **Assia GHEMMOUR** »

Thèse dirigée par « **Mohamed NAAIM** » et
codirigée par « **Guillaume CHAMBON** »

préparée au sein du **Laboratoire : CEMAGREF**
dans l'**École Doctorale : IMEP2 / Matériaux Mécanique**
Énergétique Environnement Procédés Production

Écoulements à surface libre de fluides à seuil : Rhéométrie et validation des caractéristiques hydrauliques dans un canal à fond mobile. Application aux laves torrentielles.

Thèse soutenue publiquement le «**24 octobre 2011**»,
devant le jury composé de :

M. Valéry BOTTON

Maître de conférences à l'INSA de Lyon, Rapporteur

M. Guillaume CHAMBON

Chargé de Recherche au CEMAGREF, Co-encadrant

Mme. Élisabeth GUAZZELLI

Directrice de Recherches au CNRS, Examinatrice

M. Albert MAGNIN

Directeur de Recherches au CNRS, Examineur

M. Mohamed NAAIM

Directeur de Recherches au CEMAGREF, Directeur de Thèse

M. Guillaume OVARLEZ

Chargé de Recherche au CNRS, Rapporteur



... C'est un fluide qui inonde et ravage la nature, ainsi qu'un fleuve dont les eaux paisibles s'emportent tout à coup et débordent, quand elles sont accrues par ces larges torrents de pluie qui tombent des montagnes, entraînant avec eux les ruines des bois, et des arbres entiers. Les ponts les plus solides ne peuvent soutenir le choc impétueux de l'onde, tant le fleuve, gonflé de ces pluies orageuses, heurte violemment les digues : il les met en pièces avec un horrible fracas ; il roule dans son lit des rochers énormes, et abat tout ce qui lui fait obstacle. C'est ainsi que doivent se précipiter les vents, qui chassent devant eux et brisent sous mille chocs tout ce que leur souffle vient battre comme des flots déchaînés, et qui parfois saisissent comme en un gouffre et emportent les corps dans leurs tourbillons rapides **Lucrèce, De la nature.**

Remerciements

Au terme de mon parcours en thèse, il m'est très agréable de remercier en quelques mots sincères tous ceux qui m'ont accompagnée. Il est tout naturel que je m'adresse aux piliers de ce projet. À M. Guillaume CHAMBON qui a été présent à chaque étape et qui a enrichi sans cesse notre travail par son intelligence et sa finesse de jugement. Il n'a jamais hésité à prendre part aux *manips* et aux préparations boueuses... À M. Mohamed NAAIM qui a apporté sa justesse et son regard affûté sur chaque pierre de l'édifice. À l'équipe technique, M. Frédéric OUSSET et M. Hervé BELLOT, qui ont oeuvré de la mise en place à l'amélioration continue du banc expérimental. Nous devons beaucoup à leur ingéniosité et à leur totale implication. À M. Christian EYMOND-GRIS et M. Xavier RAVANAT qui ont toujours répondu présents pour suppléer notre équipe.

Je remercie chaleureusement M. Guillaume OVARLEZ et M. Valéry BOTTON d'avoir accepté d'examiner mon mémoire de thèse. Leurs appréciations m'ont permis de prendre du recul et de préparer sereinement ma soutenance. J'adresse également mes remerciements aux membres du jury, Mme. Élisabeth GUZZELLI et M. Albert MAGNIN, qui nous ont honoré de leur participation.

Je suis très sincèrement reconnaissante pour l'accueil que m'ont réservé mes collègues et néanmoins amis du Cemagref (très récemment rebaptisé Irstea). Ces années auprès d'eux ont été si riches et agréables tant sur le plan humain que sur le plan scientifique.

Je remercie tous mes amis et ma famille, dans les quatre coins du globe, qui ont fait preuve de beaucoup de patience et de compréhension, qui m'ont épaulée et aidée en toutes circonstances.

Enfin, je me tourne vers Laurent et notre muse Calliopé. Vous savez tout le bien que vous m'avez apporté pour arriver au bout de ce chemin. Nous voilà repartis ensemble pour d'autres aventures ...

À tous, merci de tout coeur,
Assia

Résumé

Cette thèse présente une étude expérimentale visant à caractériser les propriétés hydrauliques d'écoulements à surface libre de fluides complexes : fluides viscoplastiques et mélanges fluides viscoplastiques-grains. Ce travail est motivé par la nécessité d'améliorer les connaissances sur les propriétés des écoulements de laves torrentielles, dans un contexte de protection contre les risques naturels en montagne. Nous avons développé un dispositif de laboratoire original, un canal à fond mobile, permettant de générer des coulées gravitaires qui sont globalement stationnaires dans le référentiel du laboratoire. Les coulées présentent un front très raide, suivi à l'amont d'une zone d'épaisseur uniforme. Les fluides viscoplastiques utilisés (carbopol et kaolin) ont été choisis de manière à modéliser la matrice des coulées boueuses naturelles en prenant en compte les critères de similitude adaptés. Ces fluides suivent une loi de comportement de Herschel-Bulkley, et leurs propriétés rhéologiques ont été déterminées au moyen d'un rhéomètre de laboratoire en accordant un soin particulier à l'établissement des incertitudes associées. Nous présentons des mesures précises de l'évolution de l'épaisseur des coulées dans la zone uniforme en fonction de la vitesse du fond du canal et de la pente. Ces résultats sont comparés à des prédictions théoriques correspondant à un écoulement permanent et uniforme d'un fluide de Herschel-Bulkley, et nous montrons que l'accord est satisfaisant moyennant les incertitudes sur les mesures rhéologiques. Nous avons également analysé la forme du front des coulées et, là-aussi, l'accord avec des modèles hydrauliques (modèles de type Saint-Venant) est bon. Ces deux études permettent de valider les prédictions hydrauliques obtenues à partir de lois de comportement mesurées au rhéomètre. Enfin, dans une dernière partie, nous présentons une étude préliminaire de la dynamique de particules rigides isolées placées au sein de la coulée, en nous intéressant aux vitesses longitudinales et aux vitesses de chute pour différentes tailles et différentes densités de particules.

Abstract

This thesis presents an experimental study dedicated to characterise the hydraulic properties of free surface flows of complex fluids : viscoplastic fluids and mixtures made of viscoplastic fluids and grains. This study is motivated by the need to improve knowledge on properties of the flow of debris flows in a context of protection against natural hazards in the mountains. We have developed an original laboratory device - a channel with a mobile bottom - to generate gravity flows that are globally stationary in the laboratory frame. The flows have a very steep front followed upstream by a zone of uniform thickness. Viscoplastic fluids used (carbopol and kaolin) were selected so to model the matrix of natural mud flows, taking into account the criteria of similarity adapted. These fluids follow a behavior law of Herschel-Bulkley, and their rheological properties were determined using a laboratory rheometer by providing a particular care to the establishment of the associated uncertainties. We present accurate measurements of the evolution of the thickness of the flow in the uniform zone with the velocity speed of channel belt. These results are compared with theoretical predictions corresponding to a steady uniform flow of a fluid of Herschel-Bulkley, and we show that the agreement is satisfactory through the uncertainties on the rheological measurements. We also analyzed the shape of front, and here too, the agreement with hydraulic models (models like Saint-Venant) is good. Both of the studies allowed to validate the hydraulic predictions obtained from behavior laws measured with the rheometer. Finally, in a last section, we present a Preliminary study about the dynamics of isolated rigid particles placed in the flow, by paying attention to longitudinal velocities and falling velocities for different particle sizes and densities.

Table des matières

1	Introduction et contexte de l'étude	13
1.1	Les laves torrentielles	13
1.1.1	Le phénomène	13
1.1.2	L'étude scientifique	15
1.1.3	La Modélisation	17
1.2	Problématique	23
1.2.1	Contexte	23
1.2.2	Similitude	24
1.3	Grille de lecture détaillée	25
2	Généralités	29
2.1	Notion de seuil de contrainte	29
2.2	Hydraulique à surface libre d'un fluide de Herschel-Bulkley	30
2.2.1	Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent uniforme	30
2.2.2	Modélisation de la forme de l'écoulement	32
2.3	Particule isolée dans un fluide	35
2.3.1	Bilan de forces	35
2.3.2	Critère de stabilité	38
2.3.3	Vitesse limite de chute dans un fluide :	38
3	Matériaux modèles	41
3.1	Matériaux mis en œuvre	41
3.2	Protocoles de préparation des matériaux	42
3.2.1	Protocole de préparation du carbopol ETD 2623	42
3.2.2	Protocole de préparation du kaolin	44
3.3	Caractérisation rhéologique des fluides	44
3.3.1	Détermination de la courbe d'écoulement	44
3.3.2	Paramètres des essais de rhéométrie	45
3.3.3	Phénomènes perturbateurs des mesures de rhéométrie :	51
3.3.4	Détermination des paramètres rhéologiques	54
3.3.5	Incertitude sur la courbe d'écoulement	58
3.3.6	Autres caractéristiques rhéologiques des matériaux étudiés	62
4	Dispositif expérimental : canal incliné à fond mobile	65
4.1	Principe du dispositif	65
4.2	Description du dispositif expérimental	65

4.3	Instrumentation du canal expérimental	67
4.3.1	Contrôle de la vitesse de défilement du tapis	67
4.3.2	Visualisation de la forme des coulées des fluides homogènes	69
4.3.3	Les capteurs de hauteur ponctuelle	72
5	Résultats sur les fluides homogènes	79
5.1	Caractéristiques générales des écoulements	79
5.1.1	Description du protocole expérimental	79
5.1.2	Description qualitative de l'écoulement	82
5.1.3	Profil de vitesse dans l'écoulement	83
5.1.4	Stationnarité de l'écoulement	83
5.1.5	Effets de bords	84
5.1.6	Existence de la zone de hauteur normale	86
5.2	Résultats expérimentaux	87
5.2.1	Cas du carbopol	87
5.2.2	Cas du kaolin	87
5.3	Prédictions théoriques et comparaison avec les expériences	97
5.3.1	Courbes vitesse-hauteur	97
5.3.2	Comparaison modèle théorique – expériences	99
5.4	Normalisation	99
5.4.1	Nombres sans dimension	99
5.4.2	Incertitude sur les nombres sans dimension	99
5.4.3	Normalisation de la loi d'écoulement	103
5.5	Modélisation de la forme de la coulée	108
5.5.1	Discussion	108
6	Étude des mélanges	115
6.1	Préambule	115
6.2	Cas d'une particule isolée dans du carbopol	115
6.2.1	Principe des essais	115
6.2.2	Description des essais	116
6.2.3	Détermination des trajectoires des particules	123
6.3	Résultats :	127
6.3.1	Trajectoires $2D$ de la particule	127
6.3.2	Dynamique de la particule	129
6.4	Discussion	144
7	Conclusion et perspectives	151
A	Courbes d'écoulement en régime permanent : cas du carbopol	153
B	Courbes d'écoulement en régime permanent : cas du kaolin	169
C	Paramètres d'ajustement : cas du carbopol	189
D	Paramètres d'ajustement : cas du kaolin	195
E	Courbes vitesse-hauteur : cas du carbopol	201

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	11
F Courbes vitesse–hauteur : cas du kaolin	211
G Paramètres des essais : cas d’une particule isolée	231

Chapitre 1

Introduction et contexte de l'étude

1.1 Les laves torrentielles

1.1.1 Le phénomène

Les laves torrentielles sont des écoulements gravitaires à surface libre qui affectent des vies humaines et les infrastructures et contribuent très fortement aux restructurations topographiques [38, 87]. Il s'agit d'écoulements transitoires mobilisant des volumes importants jusqu'à plusieurs millions de m^3 . La boue interstitielle, la matrice, atteint une densité élevée de 1800 à 2200 kg.m^{-3} ce qui lui permet de transporter des blocs rocheux faisant jusqu'à plusieurs mètres de diamètre. Ces coulées peuvent parcourir des distances importantes (jusqu'à plusieurs km) avec des pics de vitesse atteignant 15 m.s^{-1} . Le tableau 1.1 rassemble quelques grandeurs caractéristiques de laves torrentielles naturelles [46, 8, 55].

Les laves torrentielles se produisent en vagues (bouffées) successives [21] d'un mélange d'eau et de particules d'une granulométrie très variée allant des particules fines (argile, limon, sable) jusqu'à des fragments de roches et même à des blocs de plusieurs tonnes (voir la figure 1.1). De plus, ce mélange mobilise d'autres matériaux sur son parcours (sédiments, végétaux, ...) à travers des processus complexes d'érosion et de dépôt. L'écoulement des laves torrentielles associés à ces deux processus sont de nature à déstructurer et à façonner le sol de façon intense et irréversible.

De plus, la composition d'une lave en écoulement n'est pas uniforme sur la totalité du volume en mouvement. En effet, les différents constituants d'une lave torrentielle en phase de propagation se réarrangent sous l'effet de la dynamique de la sédimentation et de la ségrégation, en déposant ou en mobilisant des constituants. Il se forme alors des zones distinctes décrites par [8] sur la figure 1.2. Chacune de ces zones est caractérisée par un constituant prédominant. À l'avant d'une bouffée typique [21], il se forme un *front granulaire* de faible volume composé des éléments les plus grossiers. Il est suivi par le *corps* de la lave d'un grand volume, composé d'une matrice boueuse homogène et de débris épars. À l'arrière, se forme une phase boueuse de faible viscosité. À la périphérie de l'écoulement, des levées de matériaux grossiers se déposent sous forme de bourrelets latéraux.

En régions montagneuses, les laves torrentielles se produisent souvent suite à des précipitations pluvieuses sur des sols mobilisables avec une végétation rare. Dans les environnements

Paramètre	Grandeur typique
Nombre de bouffées	1 - 10
Durée totale du phénomène	quelques minutes
Vitesse du front (m.s^{-1})	1 - 15
Volume mobilisé (m^3)	10^3 - 10^6
Diamètre des particules (m)	10^{-5} - 10
Hauteur du front de l'écoulement (m)	0.5-10
Longueur de l'écoulement (m)	10 - 100
Masse volumique solide (kg.m^{-3})	2500 - 3000
Masse volumique du fluide interstitiel (kg.m^{-3})	1000-1200
Fraction volumique solide	0.4-0.8
Seuil de contrainte de l'écoulement (Pa)	$500 - 10^4$
Reynolds de l'écoulement	$1 - 4.10^4$

TABLE 1.1 – Grandeurs physiques caractéristiques des laves torrentielles naturelles.



FIGURE 1.1 – À droite, vue d'ensemble d'un dépôt de lave à l'amont d'un ouvrage de protection : nous pouvons distinguer en particulier des blocs métriques. À gauche, petits débris et éléments fins de cette même coulée.

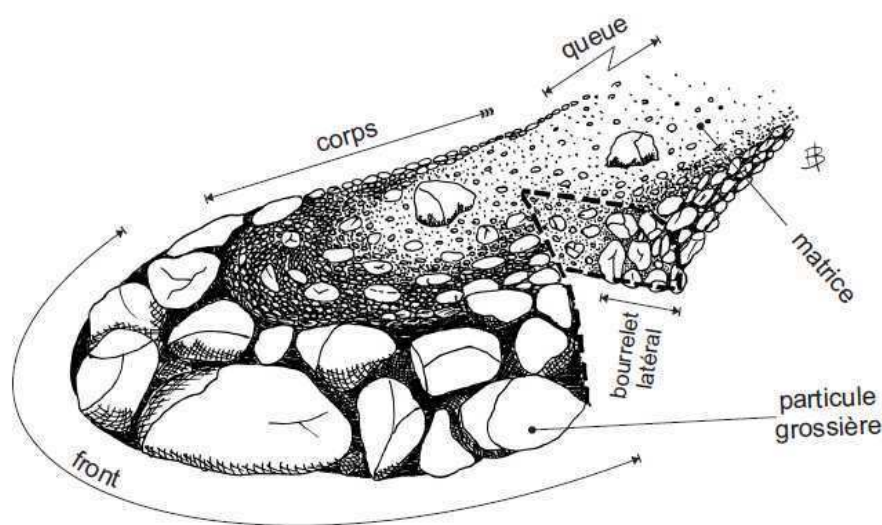


FIGURE 1.2 – Entités fonctionnelles d'une lave torrentielle [8].

semi-arides, le déclenchement de ce phénomène est favorisé par des épisodes pluvieux brefs et intenses en présence de matériaux superficiels non consolidés reposant sur un lit rocheux stable, dans des bassins versants relativement étroits. Dans un contexte volcanique, les laves connues sous le nom de *lahars* se produisent également à la faveur de fortes précipitations qui remobilisent des dépôts volcaniques.

1.1.2 L'étude scientifique

Pour comprendre ce phénomène et prévenir les dommages engendrés et leurs conséquences (voir la figure 1.3), un certain degré de connaissance sur leur comportement est requis. Les difficultés pratiques pour l'étude des laves torrentielles sur le terrain sont évidentes étant donné que ce phénomène se manifeste au plus fort d'intenses orages sur des terrains instables et raides où les accès ne sont pas aisés pour l'observation ou la mesure directe.

Les caractéristiques géologiques, géomorphologique et sédimentologiques de ce phénomène torrentiel sont largement documentées [13, 8, 55, 78]. Néanmoins, il subsiste des verrous sur la connaissance de la mécanique de ce type d'écoulements géophysiques complexes. En particulier, la littérature témoigne d'une modélisation satisfaisante de la phase d'étalement mais relève de nombreuses interrogations relatives aux phases de déclenchement et de propagation [47, 35].

Les premières tentatives d'étude de ce type de coulées se sont basées sur les témoignages et observations de terrains. Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, des études empiriques ont permis de mettre en place les premières techniques de correction torrentielle pour atténuer l'impact de ces coulées. Mais c'est dans les années 1970 qu'apparaissent les résultats des premiers travaux importants sur la dynamique des laves torrentielles se basant sur des modèles rhéologiques développés indépendamment [61]. Depuis, les connaissances sur les laves torrentielles n'ont cessé d'évoluer avec les avancées en rhéologie et en ingénierie, notamment concernant les mé-



FIGURE 1.3 – Les dégâts engendrés par les laves torrentielles.

thodes de caractérisation en rhéométrie [58]. Les applications sur les laves torrentielles peuvent dépasser ce seul cas d'étude et s'étendre à l'étude d'autres fluides complexes d'origine géophysique (laves volcaniques), d'origine biologique (sang, sève végétale) ou d'origine industrielle (polymères).

1.1.3 La Modélisation

Classification

Pour modéliser les écoulements de laves torrentielles il faut au préalable comprendre leurs caractéristiques physiques et mécaniques et bien décrire le phénomène sous ses différents aspects. Il est établi que les coulées ne sont pas semblables d'un évènement à l'autre mais différent par leurs caractéristiques dynamiques telles que la vitesse et la hauteur d'écoulement, le type de matériau constituant la coulée, la concentration des constituants, le mode d'échange avec les sols impactés (charriage, dépôt, érosion, ...). De plus, rappelons que ces coulées se produisent dans différents environnements (semi-aride, alpin et volcanique) sous des conditions spécifiques à chaque milieu (épisodes neigeux ou pluvieux, éruptions volcaniques, ...).

La modélisation de ce phénomène se heurte également à la difficulté pour situer les laves torrentielles parmi les nombreux autres écoulements géophysiques. Les laves torrentielles sont souvent décrites comme un phénomène intermédiaire entre le glissement de terrain et le transport solide [29]. Il n'y pas de classification unique et univoque des laves torrentielles. Pour les classer, les auteurs ont positionné ce phénomène par rapport à d'autres écoulements hyperconcentrés et/ou en se basant sur les propriétés dominantes des coulées, tel que l'illustrent les exemples des classifications les plus courantes [55] :

- [86] a établi un classement des écoulements hyperconcentrés sur la base des mouvements des grains au sein du mélange. Selon cette approche, on retrouve quatre types d'écoulements : *chutes*, dans lesquels les particules se déplacent séparément avec des déformations internes relativement faibles ; *sturzstrom* ou écoulements granulaires fluidisés, particulièrement rapides et destructeurs ; les écoulements *pyroclastiques* qui constituent des évènements rapides et explosifs d'origine volcanique et enfin les laves torrentielles (*debris flows* en anglais), dans lesquels les particules sont dispersées dans un fluide interstitiel composé d'un mélange d'eau et d'argile.
- Pour [68], les écoulements se distinguent par leur concentration en sédiments et par les propriétés de l'écoulement, selon trois classes. Les *écoulements hyperconcentrés* constitués de particules non cohésives (en particulier, le sable) avec une quantité limitée de particules cohésives. Les *coulées boueuses* sont quant à elles des écoulements composées par des particules d'argile et de silts cohésives (inférieure à 0.0625 mm) au sein desquelles la concentration en sédiments en volume varie de 45 % à 55 %. Cette composition rend le fluide interstitiel extrêmement visqueux et lui confère des propriétés de seuil de contrainte (fluide à seuil). Enfin, les *laves torrentielles* comprennent un mélange de matériaux clastiques de toutes tailles dans lequel la collision entre particules est le mécanisme dominant.

- [21] a classé les laves torrentielles selon le pourcentage de particules fines, c'est à dire les particules de moins de $40 \mu.m$. Il a considéré qu'une lave torrentielle est *granulaire* lorsque le pourcentage en fine n'excède pas 10 % et elle est *boueuse* au delà de cette fraction en fines.
- [77] propose une classification rhéologique des écoulements hyperconcentrés en considérant la vitesse moyenne en fonction de la concentration solide. Le type d'écoulement est indiqué en lettres majuscules sur la figure 1.4. La désignation du comportement rhéologique, en lettres minuscules, est limitée par les lignes verticales (*A*, *B*, *C*) et dépend de la taille des grains et de la concentration. La limite en *A* désigne l'apparition d'un seuil de contrainte; la ligne *B* indique le point d'augmentation soudaine et rapide du seuil de contrainte rendant possible la suspension de particules grossières et l'initiation de la liquéfaction; enfin la ligne *C* marque la limite de fluidification.
- [2] propose une classification en corrélation avec des analyses granulométriques réalisées sur des échantillons issus des dépôts de laves torrentielles naturelles. Cette classification est le résultat d'essais de laboratoire et d'observation de terrain soutenus par des analyses théoriques sur les comportement des mélanges (voir la figure 1.5). Il en résulte trois classes de laves torrentielles correspondant chacune à un comportement rhéologique : *viscoplastique* pour décrire des coulées boueuses, *frictionnel-collisionnel* pour des écoulements granulaires et *frictionnel-visqueux* pour des lahars.
- [9] ont étudié l'effet de la fraction de fines sur le comportement rhéologique de laves torrentielles naturelles dans les Alpes. Cette étude a consisté à modéliser ce type de coulées avec un mélange de fractions granulométriques bien caractérisées en variant la composition en argiles. Les expériences réalisées avec les matériaux reconstitués ont été ensuite comparées aux résultats obtenus avec les matériaux naturels et ont montré en particulier que les paramètres rhéologiques des mélanges dépend de la distribution granulométrique des constituants solides (voir la figure 1.6). Ils désignent trois types de comportements majeurs basés sur le pourcentage massique cumulé de la classe du diamètre des grains, déterminés à partir d'échantillons de laves torrentielles naturelles : comportement *viscoplastique*, *collisionnel-frictionnel* et *frictionnel-visqueux*.

Loi de comportement

L'étude du comportement des laves torrentielles en écoulement [30, 21, 2], requiert d'associer les équations de mouvement à une loi constitutive qui traduise la nature complexe de ce phénomène. En effet, la description du comportement physique doit caractériser une large gamme de matériaux constitutifs, présents sous différentes concentrations et dans différentes entités de la coulée. De plus, cette loi doit appréhender des propriétés et des régimes d'écoulements d'une grande complexité. La résolution de ce problème s'avère donc difficile et un seul modèle constitutif ne suffit pas pour décrire la totalité de ces éléments.

Le plus souvent, les modèles proposés pour les laves torrentielles ne prennent pas en compte les processus d'érosion et de dépôt au sein d'une coulée et l'hétérogénéité des constituants (granulométrie et entités fonctionnelles). L'écoulement est alternativement schématisé comme étant un mélange monophasique avec une densité constante ou alors comme étant biphasique

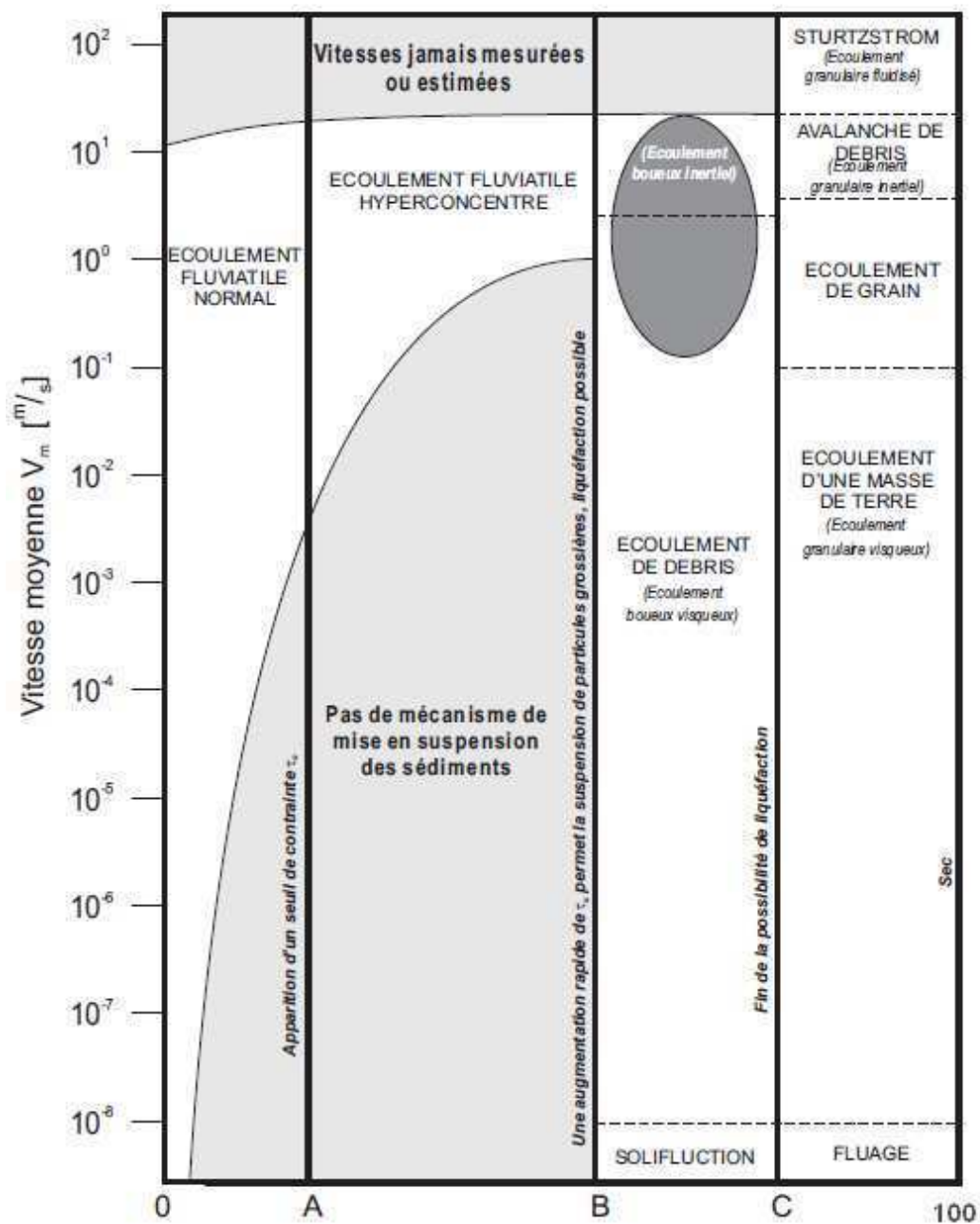


FIGURE 1.4 – Classification rhéologique de [77] pour des mélanges eau-sédiments (voir [8]).

Nom scientifique proposé		<i>Lave torrentielle à comportement viscoplastique</i>	<i>Lave torrentielle à comportement frictionnel-collisionnel</i>	<i>Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux</i>
Nom commun		<i>Lave torrentielle boueuse</i>	<i>Lave torrentielle granulaire</i>	<i>Lahar^d</i>
Caractéristiques de terrain	Forme et nature des dépôts	Régulier, avec des limites assez bien définies, encore fluide quand saturé d'eau, très cohésif quand sec	Chaotique avec des limites pas nécessairement franches, pas de cohésion des dépôts	En forme de terrasse alluvionnaire, cohésion suffisante pour supporter le poids d'un homme
	Forme des bourrelets et des lobes	Forme arrondie 	plane 	Pas de bourrelet
	Pente de la zone d'arrêt	>5%	>15 %	>0,1 %
Caractéristiques mises en évidence en laboratoire	Rhéologie	Loi de comportement viscoplastique (Bingham, Herschel-Bulkley)	Loi de comportement de type Coulomb	Loi de comportement Coulomb aux faibles vitesses et Newton aux fortes vitesses
	Nombre de paramètres de la loi de comportement	2 ou 3 (K, n, τ_c)	2 (K, ϕ)	1 à 2 (ϕ , μ)
	Granulométrie	Matrice fine importante avec quantité importante d'argiles	Matrice fine faible, peu d'argiles	Matrice fine importante avec peu d'argiles et beaucoup de silts
	Essais d'identification des sols	Sols argileux	Sols grossiers	Sols limoneux, le plus souvent d'origine volcanique
Témoignages	Vitesse observée (m/s)	1-30	?	1-30

FIGURE 1.5 – Classification rhéologique des laves torrentielles [2].

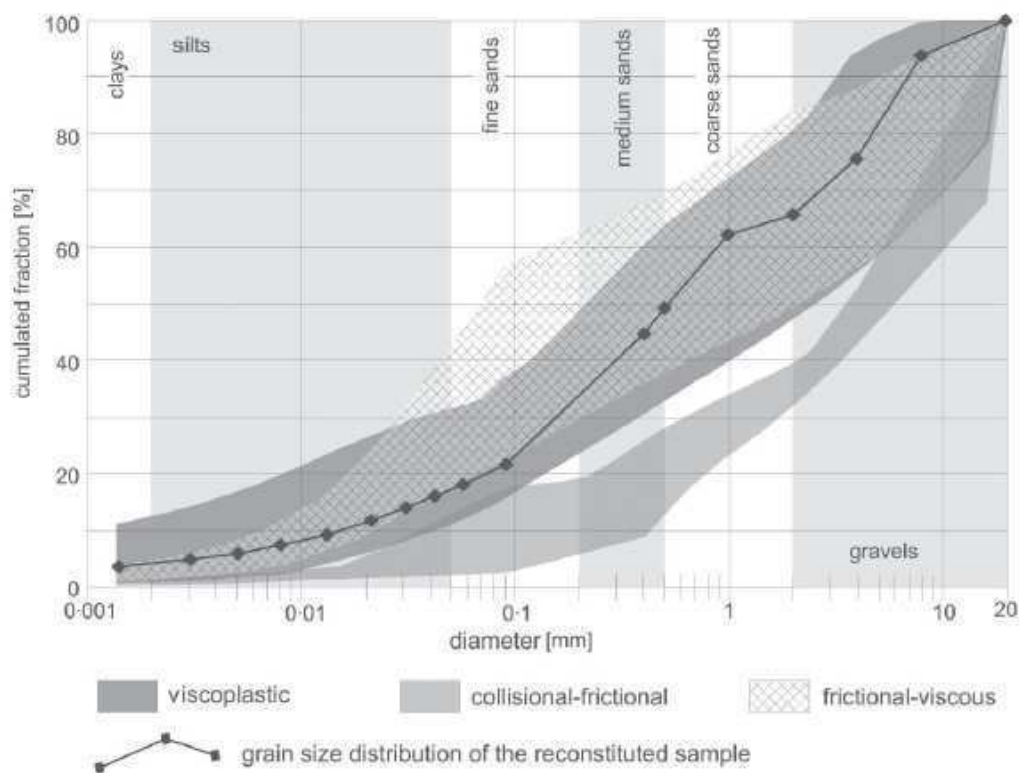


FIGURE 1.6 – Modèle viscoplastique granulaire de [9] sur la base de la courbe granulométrique des laves torrentielles naturelles.

avec une densité variable d'un mélange de matériaux rigides eu sein d'un fluide interstitiel. Ces hypothèses influencent fortement le choix du modèle rhéologique.

Les modèles basés sur une densité constante ne peuvent pas représenter les effets de séparation des sédiments nécessaire pour reproduire des configurations dans lesquelles les matériaux grossiers dans les parties supérieures du cône alluvionnaire ou près des obstacles dans les lits de rivières. La modélisation du fluide selon une approche biphasique surmonte ces limitations et permet un large choix de modèles rhéologiques [44]. [45] propose un modèle biphasique basé sur une rhéologie fixée avec une modèle théorique de Coulomb pour représenter les interactions des constituants solides et fluides dans ces coulées complexes.

L'approche monophasique initiée par les travaux [32, 33, 5] a permis d'aboutir à des modèles rhéologiques bien fondés pour les laves boueuses, qui sont les plus fréquentes dans les Alpes. Ces modèles ont ensuite permis d'étudier l'hydraulique et les régimes d'écoulement de ces laves, aussi bien au laboratoire [23] que par simulations numériques [27, 52, 79]. Au cours de cette dernière décennie, des comparaisons fructueuses entre des événements réels et des prédictions de simulations numériques ont prouvé tout l'intérêt ces approches [37, 62, 79]. Enfin, des progrès substantiels ont été réalisés sur le thème de l'interaction entre les laves torrentielles et des obstacles [88].

Pour prédire les caractéristiques des laves torrentielles il est nécessaire d'en connaître les propriétés rhéologiques. La détermination directe de ces paramètres rhéologiques avec des outils de rhéométrie conventionnels¹ est rendue difficile ou même impossible au vu des outils disponibles et des tailles importantes de grains présents dans les coulées. [21] a construit un rhéomètre de grande dimension pour étudier directement la loi de comportement des coulées naturelles. Cependant il a souligné que les mesures obtenues avec ce type d'appareil sont moins précises que celles issues d'un rhéomètre classique. Il met l'accent sur l'importance des effets perturbateurs et la complexité des problèmes théoriques de ce type d'appareil. L'une des alternatives les plus couramment utilisés pour caractériser la rhéologie des laves torrentielles, dans l'hypothèse d'un fluide homogène, est de préparer des suspensions à partir des composants fins de laves réelles ou à partir de composants modèles qu'il est possible de tester en laboratoire [28]. Ces études utilisent communément des petits volumes de fluides (jusqu'à une dizaine de cm^3 avec de larges gammes de taux de cisaillement (jusqu'à plusieurs milliers de s^{-1})).

Sur la base de ces études, différents modèles rhéologiques ont été proposés. [18] a répertorié les modèles rhéologiques testés par différents auteurs. La majorité d'entre eux peuvent être classés dans l'une des deux catégories suivantes : le modèle de *Bingham* pour décrire des fluides viscoplastiques est le plus largement utilisé pour les laves boueuses, le modèle inertiel de *Bagnold* pour décrire le comportement des laves granulaires. Mais depuis les années 1990, de plus en plus d'études montraient qu'une loi de comportement de type *Herschel-Bulkley* serait plus adaptée aux laves torrentielles boueuses [21, 22, 42, 3] en confortant des études plus anciennes [64].

Les propriétés et la dynamique des écoulements des laves torrentielles sont souvent assimilées à des écoulements à surface libre impliquant des matériaux viscoplastiques. Ce type

1. Courbe d'écoulement en régime permanent uniforme

d'écoulements ont fait l'objet de nombreuses études notamment concernant la formulation de modèles de couche mince [74, 42, 7]. En première approximation, la lave torrentielle peut être considérée comme étant un écoulement à surface libre de fluide homogène, à l'échelle macroscopique d'observation, si on néglige l'effet de phénomènes tels que les fluctuations de concentration, l'hétérogénéité de la granulométrie, discontinuités locales du champ de cisaillement (fractures localisées, glissement), érosion, sédimentation ou ségrégation [65]. Dans ce contexte, et avec une densité de fluide constante, il est assez courant de recourir aux équations de Saint-Venant ou à ses formes dérivées pour modéliser les écoulements transitoires des laves torrentielles [85, 6]. Les différentes approches numériques se basant sur les équations de Saint-Venant se distinguent principalement par la formulation de la loi de frottement déduite des hypothèses sur le comportement rhéologique des laves torrentielles.

1.2 Problématique

1.2.1 Contexte

Les laves torrentielles sont des coulées gravitaires qui représentent un risque naturel majeur dans les zones de montagne. Les progrès dans la modélisation de ces phénomènes seraient d'une importance capitale pour participer à l'amélioration de la cartographie de l'aléa et au dimensionnement des ouvrages de protection. À cet égard, l'objectif de la thèse s'inscrit dans une démarche visant à l'amélioration de la connaissance des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux impliqués dans les écoulements de laves torrentielles. Le but est d'affiner les modèles d'écoulements existants. À terme l'ensemble des connaissances acquises participera à l'amélioration de la cartographie de l'aléa et au dimensionnement des ouvrages de protection.

Dans cette étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices qui nous placent dans le cas d'une bouffée de laves torrentielles boueuses durant sa phase de propagation en faisant abstraction des interactions avec l'environnement. En particulier, nous nous intéressons au corps de la lave et au front (voir la figure 1.2) qui se comportent comme *des fluides homogènes se déformant continûment* [21]. Nous nous plaçons dans l'approximation de l'écoulement d'un fluide homogène décrit par une loi rhéologique de Herschel-Bulkley sur un plan incliné. Les équations constitutives de ce type d'écoulement en régime permanent uniforme sont disponibles dans la littérature (voir la partie 2.2).

Nous voulons étudier le comportement rhéologique des laves torrentielles à l'aide d'un canal incliné muni d'un fond mobile. L'objectif de notre étude est de générer des coulées stationnaires dans des conditions contrôlées de laboratoire, en similitude avec les laves torrentielles naturelles. Le but est d'étudier leur forme et leur comportement pour des temps suffisamment longs et d'explorer différentes vitesses. Dans ces conditions, nous voulons tester différents matériaux avec différentes dimensions du canal (pente, largeur).

Dans un premier temps nous avons donc réalisé des expériences avec des fluides homogènes que l'on peut caractériser indépendamment avec les techniques de rhéométrie classiques sur des petits volumes de fluide (de l'ordre de quelques cm^3). Le but étant de valider les mesures directes de vitesse-hauteur et de la forme globale de la coulée sur le canal, par les prédictions théoriques décrivant ces écoulements.

Dans un second temps, nous avons ajouté aux fluides homogènes des particules rigides de forme sphérique. Nous avons vu précédemment que les modèles existants ne s'appliquent en fait qu'au *corps* des coulées, lequel se présente effectivement comme un fluide boueux relativement homogène. Mais en réalité, il s'agit le plus souvent de coulées hétérogènes composées de débris de toutes tailles. En l'état actuel des connaissances, le comportement mécanique du matériau global reste très mal connu [47]. À ce propos, nous avons voulu prendre en compte l'hétérogénéité du matériau constitutif des laves dans les modèles d'écoulements. Ainsi, nous avons réalisé des expériences préliminaires pour comprendre le comportement des mélanges fluide-grains. Nous avons alors étudié le cas simplifié de la dynamique d'une particule isolée dans le fluide homogène. À terme, l'objectif est d'ajouter progressivement des grains et étudier différentes concentrations de mélanges fluide-grains en similitude avec des laves torrentielles naturelles.

1.2.2 Similitude

Les règles de similitude physique qui régissent le lien entre les paramètres du modèle et des laves naturelles sont décrites avec les nombres sans dimensions suivants [27] :

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gH \cos \theta}}, \quad (1.1)$$

$$G = \frac{\rho g H \sin \theta}{\tau_c}, \quad (1.2)$$

$$H_b = \frac{\tau_c}{k} \left(\frac{H}{u} \right)^n, \quad (1.3)$$

$$(1.4)$$

où g est l'accélération de la gravité, ρ est la densité du fluide, H l'épaisseur caractéristique de l'écoulement, θ l'angle de pente du canal expérimental, u la vitesse caractéristique de l'écoulement et τ_c , k , et n sont les paramètres rhéologiques du fluide de Herschel-Bulkley, le seuil de contrainte, la consistance et l'indice d'écoulement (voir l'expression 3.4).

On désigne une coulée naturelle selon une échelle de longueur H_{nat} , de densité ρ_{nat} qui se comporterait comme un fluide de Herschel-Bulkley décrit par les paramètres rhéologiques $\tau_{c,nat}$, k_{nat} et n_{nat} . Pour générer une coulée similaire dans le même champ de pesanteur, il est nécessaire de décrire un écoulement de fluide, selon une échelle de longueur H_{mod} , avec une densité ρ_{mod} et des paramètres rhéologiques $\tau_{c,mod}$, k_{mod} et n_{mod} . Pour respecter la similitude entre la coulée prototype et modèle, en considérant un rapport d'échelle constant de $\frac{H_{mod}}{H_{nat}} = \lambda$, il faut satisfaire les conditions suivantes :

$$F_{r,mod} = F_{r,nat} \implies \frac{u_{mod}}{u_{nat}} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

$$G_{mod} = G_{nat} \implies \tau_{c,mod} = \tau_{c,nat} \cdot \frac{\rho_{mod}}{\rho_{nat}} \cdot \lambda \quad (1.6)$$

$$H_{b,mod} = H_{b,nat} \implies k_{mod} = k_{nat} \cdot \frac{\rho_{mod}}{\rho_{nat}} \cdot \lambda^{\frac{7}{6}} \quad (1.7)$$

Paramètre	Grandeur dans la nature	Grandeur pour le Modèle
Hauteur moyenne de la coulée (m)	3	0.06
La vitesse moyenne de la coulée (m.s^{-1})	1.5	0.21
Le seuil de contrainte (Pa)	1000	20
La consistance (Pa.s^n)	3000	31

TABLE 1.2 – Grandeurs principales de laves torrentielles naturelles et ordre de grandeur des coulées modèles obtenu selon les critères de similitude.

Si on ajoute une particule de diamètre δ et densité ρ_p , nous considérons les rapports simples $\frac{\rho_p}{\rho}$ avec une similitude géométrique maintenue avec le rapport $\frac{\delta}{H}$.

Au sens strict de la 'similitude' en mécanique des milieux continus, il faut satisfaire l'ensemble des nombres sans dimension qui décrivent le système. Mais en pratique, les caractéristiques des laves torrentielles naturelles sont complexes car elles couvrent une large gamme de hauteur, de vitesse et de paramètres rhéologiques, de plus la densité est hétérogène au sein de l'écoulement et dans le temps. Enfin, il existe aussi des corrélations entre les paramètres.

Il est donc très difficile de satisfaire toutes les relations de similitudes. Mais en pratique, nous avons choisi de respecter l'ordre de grandeur des trois nombres sans dimensions F_r , G et H_b en considérant les conditions de similitude énoncées dans les expressions 1.5, 1.6 et 1.7. De plus, nous repectons le rapport de densité $\frac{\rho_p}{\rho}$ dans le cas d'une particule isolée. Pour simplifier le problème nous avons choisi de considérer que $n_{mod} = n_{nat}$ avec un indice $n_{nat} = 1/3$ [23]. De plus, le rapport k/τ_c est souvent considéré de l'orde de 3 SI dans la nature.

Pour faire un choix dans les larges gammes de paramètres des coulées naturelles on procède par tâtonnement, d'une part en respectant les valeurs possibles dans la nature et d'autre part en envisageant ce qui est réalisable dans nos conditions de laboratoire. Dans notre cas, nous pouvons nous référer à des expériences similaires réalisées sur un canal expérimental (voir [2]).

Le tableau 1.2 résume les paramètres des grandeurs des laves torrentielles naturelles retenues pour notre étude et les paramètres du modèle qui découlent des conditions de similitude et de nos hypothèses. Ces grandeurs nous amènent à considérer des expériences avec des valeurs de Froude plutôt faibles de l'ordre de 0.3, $H_b = 0.4$ et $G = 29$, avec un rapport d'échelle $\lambda = 1/50$. Rappelons que les nombres H_b et G sont calculés en fonction des paramètres rhéologiques pour lesquels il existe des corrélations.

1.3 Grille de lecture détaillée

Dans le chapitre 1, nous avons d'abord introduit le contexte scientifique motivé par l'étude des laves torrentielles. Ces coulées constituent un risque dans les régions montagneuses. Une lave torrentielle se manifeste sous forme de bouffées successives d'un mélange hétérogène d'eau et de débris de toutes tailles qui se réarrangent en trois zones distinctes, avec un front granulaire suivi du corps de la lave et enfin la queue. Pour situer le phénomène des laves torrentielles

parmi d'autres types d'écoulements géophysiques, nous avons passé en revue les classifications les plus courantes. Nous retiendrons en particulier que ces coulées sont souvent modélisées avec une loi de comportement de Herschel-Bulkley. Différents auteurs adoptent une approche monophasique en considérant un fluide homogène avec une densité constante et se basent sur les équations de Saint-Venant en approximation d'un écoulement à surface libre.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons posé la problématique du sujet de thèse. Notre étude a pour objectif de mieux comprendre les propriétés rhéologiques de ces coulées naturelles. Elle porte particulièrement sur le comportement de la zone du corps de la lave torrentielle boueuse, dans une bouffée en phase de propagation. Notre méthodologie est essentiellement expérimentale en similitude avec des grandeurs typiques de laves torrentielles naturelles. Les expériences consistent à générer des coulées stationnaires sur un canal incliné muni d'un fond mobile. Nous avons utilisé deux fluides homogènes bien représentés avec une loi de comportement de Herschel-Bulkley, dont les paramètres rhéologiques sont déterminés au rhéomètre. Nous avons adopté dans notre étude une approche monophasique en nous basant sur les équations d'hydraulique à surface libre. Enfin, nous nous sommes intéressés à la dynamique d'une particule isolée dans le fluide homogène pour modéliser les débris solides dans la matrice des coulées naturelles. À terme, le but est d'étudier les mécanismes des mélanges fluide-grains en prenant en considération l'hétérogénéité des coulées de laves torrentielles.

Dans le chapitre 2, nous avons développé les principales thématiques abordées dans notre étude. Nous avons introduit la notion de seuil de contrainte car c'est une valeur cruciale dans notre méthodologie de caractérisation des matériaux modèles. Nous avons ensuite rappelé les équations d'hydraulique à surface libre qui décrivent les écoulements de fluides de Herschel-Bulkley sur le canal. Enfin, nous avons donné un aperçu des éléments qui concernent l'étude de la dynamique d'une particule isolée dans un fluide homogène.

Dans la première partie du chapitre 3, nous avons présenté les deux fluides utilisés pour modéliser la matrice boueuse des laves torrentielles. Il s'agit du carbopol qui est un micro-gel polymérique viscoplastique transparent et du kaolin qui est une argile naturelle finement concassée. Ils ont l'avantage de posséder des propriétés viscoplastiques (seuil de contrainte de l'ordre de 10 Pa), ils sont stables et faciles à préparer.

Dans la deuxième partie, nous avons décrit les protocoles de préparation des solutions homogènes. L'obtention du gel final de carbopol nécessite deux phases. La première phase de préparation consiste à disperser la poudre de carbopol dans de l'eau déminéralisée, selon une concentration massique de 1 %. La seconde phase consiste à neutraliser le mélange avec une solution de soude pour obtenir le pH souhaité. On obtient des solutions de carbopol avec une masse volumique de 1000 kg.m^{-3} . Pour préparer les solutions de kaolin avec une concentration massique de 44 %, on ajoute progressivement de la poudre concassée de kaolin à de l'eau déminéralisée en agitant le mélange. La solution finale a une masse volumique de l'ordre de 1400 kg.m^{-3} .

La dernière partie du chapitre a été consacrée à la caractérisation rhéologique des matériaux utilisés. Tout d'abord, nous avons décrit le mode de détermination de la courbe d'écoulement. Les mesures de rhéométrie ont été obtenues avec un rhéomètre rotatif muni d'une géométrie plan-plan rugueux, avec deux tailles d'outils supérieurs (40 mm et 60 mm) et des tailles d'en-

trefer de 1 mm, 1.5 mm et 2 mm. La courbe d'écoulement en régime permanent a été obtenue selon un protocole de paliers de taux de cisaillement décroissant dans la gamme allant de 10^{-3} s^{-1} à 10^2 s^{-1} , en utilisant souvent 30 paliers de 15 secondes. Nous avons appliqué un cisaillement avant chaque essai. Dans le cas du carbopol, chaque essai est réalisé deux fois à la suite tandis qu'on ne réalise qu'un seul essai dans le cas du kaolin. Les essais de caractérisation des deux matériaux sont réalisés sur des échantillons prélevés sur le canal. Dans le cas du carbopol, nous avons aussi caractérisé certains échantillons prélevés avant l'essai sur le canal.

Enfin, nous avons détaillé la détermination de l'incertitude sur les paramètres rhéologiques et de l'incertitude sur les courbes d'écoulement. Pour estimer l'incertitude sur les paramètres rhéologiques obtenus pour chaque série d'essais, nous nous sommes basés sur la population qui compte le plus grand nombre d'essais. Nous avons donc exploité la série des 19 essais avec répétitions du carbopol *carb000*, pour les deux matériaux modèles. Pour représenter l'incertitude sur la courbe d'écoulement nous avons également utilisé ce matériau de référence. La méthode consiste à déterminer une enveloppe d'incertitude autour du rhéogramme moyen de la série d'essais de caractérisation. Les essais étant à taux de cisaillement imposé, il reste alors à estimer l'incertitude sur la contrainte cisailante pour chaque niveau de sollicitation.

Dans le chapitre 4 nous avons détaillé la description du dispositif expérimental et de l'instrumentation associée ainsi que les méthodes de mesure. Le dispositif expérimental consiste en un canal incliné, de pente réglable jusqu'à 30° , de géométrie rectangulaire de 3 m de long et d'une largeur ajustable jusqu'à 0.6 m. Le tout est réglable finement pour limiter les fuites de fluide. Le canal expérimental est muni d'un fond mobile composé d'un tapis roulant se déplaçant vers l'amont. À l'arrière du canal, la circulation du fluide est forcée par une paroi rigide perpendiculaire au fond. Le tapis est entraîné par un moteur avec une vitesse contrôlée dans la gamme $0\text{-}1.5 \text{ m.s}^{-1}$. La vitesse de défilement du tapis est enregistrée avec un capteur optique de déplacement installé sur le moteur. L'écoulement est filmé à travers les rives transparentes et la forme de la surface libre est extraite des images. Des capteurs à ultrasons et à technologie laser donnent des mesures ponctuelles d'épaisseur d'écoulement sur le canal.

Le chapitre 5 décrit les expériences réalisées avec les fluides homogènes et les caractéristiques des écoulements et présente les résultats de ces essais. L'expérience typique consiste à déposer un volume de fluide sur le tapis en variant la vitesse du tapis, souvent par paliers croissants, pour une largeur et une pente donnée du canal. Le volume de la coulée est ajusté en continu afin de maintenir une longueur d'environ 1 m. Chaque matériau mis en œuvre est caractérisé selon les protocoles décrits au cours du chapitre 3. Pour chaque essai, nous mesurons systématiquement la hauteur d'écoulement dans la zone d'épaisseur constante et la vitesse de défilement du tapis. Les techniques ainsi que les protocoles de mesure sont détaillés dans le chapitre 4.

L'écoulement se présente sous la forme de trois zones distinctes, un front raide à l'avant suivie d'une surface libre qui s'aplanit jusqu'à devenir parallèle au fond (hauteur normale) puis tend à augmenter à nouveau près de la paroi amont. Il est important de souligner que toutes nos expériences ont systématiquement donné lieu à l'établissement de coulées stationnaires pour lesquelles la hauteur normale augmente avec la vitesse du tapis. De plus les effets de bords sont faibles sur le canal expérimental. Les vitesses locales du fluide sont orientées vers l'amont près du fond et vers l'aval à proximité de la surface libre, ce qui amène à une vitesse moyenne nulle.

Les mesures de hauteur normale sont confrontées à celles obtenues avec un canal classique dans un cas bidimensionnel pour un fluide de Herschel-Bulkley, en régime permanent uniforme. Dans ce modèle, la vitesse moyenne est égale à la vitesse de défilement du tapis, en supposant que le convoyeur ne change pas le profil de vitesse de l'écoulement. L'accord entre la hauteur mesurée et les valeurs prédites par ce modèle est relativement bon, dans le cas du carbopol et du kaolin. L'augmentation, avec la vitesse de défilement du tapis est correctement reproduite mais pour le carbopol, il existe systématiquement une légère différence quantitative entre les points de données et les prédictions théoriques.

Nous nous sommes également intéressés à la forme du front des coulées avec des expériences réalisées avec du kaolin. Nous avons étudié l'évolution de la hauteur normale et de la forme de la coulée en fonction de la vitesse du tapis. La forme de la coulée est obtenue avec une technique de projection laser. Nos mesures expérimentales sont en bon accord avec les prédictions théoriques fondées sur un modèle de couche mince, dans le cas d'un fluide Herschel-Bulkley.

Dans le chapitre 6, nous avons initié l'étude des mélanges fluide-grains avec la dynamique d'une particule isolée dans du carbopol en écoulement sur le canal expérimental. La particule en mouvement dans le fluide transparent est filmée de face. À partir de traitements d'image adaptés, nous avons déterminé ses trajectoires et ses vitesses. Nous avons par la suite comparé nos mesures de vitesses aux prédictions théoriques. D'une part nous avons comparé la vitesse longitudinale de la particule à la vitesse théorique du fluide. D'autre part, nous avons comparé la vitesse de chute de la particule à la vitesse de chute théorique d'une particule dans l'hypothèse d'un fluide newtonien en régime de *Stokes*. Globalement, les vitesses expérimentales sont bien reproduites par la vitesse théorique du fluide et la vitesse théorique de chute de Stokes.

Chapitre 2

Généralités

2.1 Notion de seuil de contrainte

Le modèle viscoplastique de *fluide à seuil* de Herschel-Bulkley (voir l'expression 3.4) est couramment employé pour décrire le comportement des laves torrentielles, ou du moins pour décrire le comportement de sa matrice boueuse constituée d'eau et de particules fines. Ce modèle permet également de décrire le comportement de nombreux fluides industriels ou géophysiques [12, 3].

La notion de seuil d'écoulement est documentée dès le début du XX^{ème} siècle, dans la formulation monodimensionnelle, plastique viscoélastique, du modèle de Maxwell pour l'étude d'une suspension de gélatine [83]. Ce modèle a été à la base du développement de la rhéologie viscoplastique, et en particulier pour la formulation de Herschel-Bulkley [81].

Il n'y a pas de définition univoque de ce seuil de contrainte, les définitions varient selon l'approche théorique, le contexte expérimental. Le seuil de contrainte est communément décrit comme étant *la contrainte en dessous de laquelle aucun écoulement n'est observable dans les conditions d'expérimentation*. Le concept de seuil de contrainte apparent a été largement adopté en tant que mesure empirique obtenue avec divers outils de rhéométrie [25]. Cependant, un débat est né autour de cette notion de seuil de contrainte [11]. Plus tard, [10] présente son analyse sur le concept de seuil à travers une synthèse de la littérature scientifique depuis les fondements de la rhéologie jusqu'aux derniers développements dans la fin des années 1990. Il en conclut que le seuil de contrainte n'existe pas, en arguant que le matériau continue à se déformer sans que les outils expérimentaux ne soient assez sensibles pour détecter le mouvement. Il répond également aux détracteurs qui définissent le solide comme étant un matériau qui cesse de se déformer et donc de s'écouler à partir d'un certain niveau de contrainte.

La controverse se précise autour de la question de la définition d'un seuil de contrainte qui serait soit une transition nette solide-fluide [31] ou une transition entre deux états fluides avec des viscosités nettement différentes [11]. [66] tranchent dans ce débat en affirmant qu'il existe bien un seuil de contrainte qui marque une nette transition entre un état solide et un état fluide. Ils démontrent qu'en dessous de cette valeur seuil, le matériau se comporte comme un solide avec une viscosité apparente infinie, mesurée en régime permanent. Cette étude expérimentale prouve que la mesure de la viscosité, près du seuil, opérée par les détracteurs de l'existence d'un seuil serait en fait un artefact de mesure qui apparaît en régime non permanent. Les auteurs

comparent aussi leurs résultats à des mesures obtenues sur des fluides à seuil thixotropes. Ainsi, [36] confortent leurs assertions en démontrant que ces matériaux se comportent bien comme un solide *viscoélastique*, en dessous du seuil de contrainte. Plus précisément, ils concluent que la distinction est nette entre le régime solide pour lequel on observe une saturation de la déformation dans le temps et le régime fluide, pour lequel la déformation augmente en régime permanent. Cette étude a permis de mettre à jour un paramètre fondamental pour décrire la transition solide-liquide. Il s'agit d'un taux de cisaillement critique, associé au seuil de contrainte, en dessous duquel le matériau ne peut pas s'écouler en régime permanent. L'étude expérimentale de [31, 35] montre que la transition liquide-solide est abrupte puisque on observe une bifurcation de viscosité au niveau de ce taux de cisaillement critique.

2.2 Hydraulique à surface libre d'un fluide de Herschel-Bulkley

2.2.1 Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent uniforme

On s'intéresse à un écoulement à surface libre d'un fluide de Herschel-Bulkley sur un plan incliné de pente θ (figure 2.1). On considère un écoulement permanent et uniforme dans la direction (Ox) . L'épaisseur de l'écoulement est constante $h = H_N$. De plus, on considère que l'écoulement est bidimensionnel (invariant par translation selon l'axe z), alors le profil de vitesse dans l'écoulement est purement rectilinéaire. Ce qui signifie que la vitesse u est colinéaire à l'axe x et ne dépend que de y de sorte que $u = u(y)e_x$. Dans ces conditions, les équations de la dynamique du fluide se ramènent à :

- L'évolution hydrostatique de la pression p :

$$p = \rho g \cos \theta (H_N - y) \quad (2.1)$$

avec ρ la densité du fluide, θ l'angle de la pente et g l'accélération de la pesanteur.

- L'équilibre entre la contrainte cisailante τ_{xy} et la composante selon x de la gravité :

$$\tau_{xy} = \rho g \sin \theta (H_N - y) \quad (2.2)$$

La contrainte τ_{xy} est reliée au gradient de vitesse local du/dy par le biais de la loi constitutive de *Herschel-Bulkley* :

$$\frac{du}{dy} = 0 \quad \text{si } \tau_{xy} < \tau_c \quad (2.3)$$

$$\tau_{xy} = \tau_c + k (du/dy)^n \quad \text{si } \tau_{xy} > \tau_c \quad (2.4)$$

où τ_c représente la contrainte-seuil, k la consistance et n l'indice d'écoulement du fluide.

En injectant cette loi rhéologique dans l'équation d'équilibre 2.2 on obtient, après intégration suivant y , le profil de vitesse d'écoulement théorique :

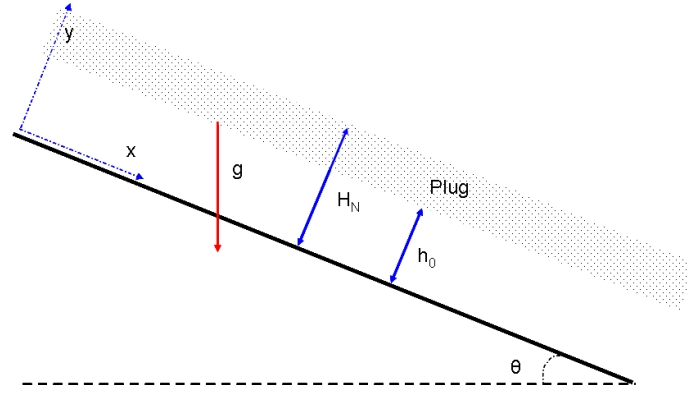


FIGURE 2.1 – Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent et uniforme sur un plan : notations.

$$u_y = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h_0^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \left(1 - \frac{y}{h_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad \text{si } y < h_0 \quad (2.5)$$

$$u_y = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h_0^{\frac{n+1}{n}} \quad \text{si } y \geq h_0 \quad (2.6)$$

avec $h_0 = H_N - \tau_c / \rho g \sin \theta$.

L'allure du profil théorique décrit par l'expression 2.6 est représentée sur la figure 2.2. La figure montre en particulier que du fait de l'existence de la contrainte seuil, l'écoulement présente une zone non cisailée nommé bouchon ou *plug* en anglais [23] pour $y \geq h_0$.

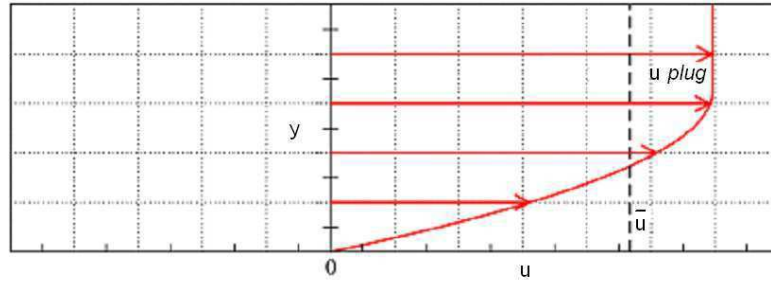


FIGURE 2.2 – Profil de vitesse théorique de l'écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent et uniforme sur un plan incliné.

La vitesse moyenne de l'écoulement se déduit en intégrant le profil vertical de la vitesse :

$$\bar{u} \equiv \frac{1}{H_N} \int_0^{H_N} u(y) dy \quad (2.7)$$

L'expression de la vitesse moyenne de l'écoulement est donnée comme :

$$\bar{u} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{n}{2n+1} \frac{h_0}{H_N} \right) h_0^{\frac{n+1}{n}} \quad (2.8)$$

2.2.2 Modélisation de la forme de l'écoulement

Principe du modèle

De nombreux modèles fondés sur les équations de Saint-Venant ou des variantes ont été mis en oeuvre afin de décrire différents cas d'écoulements à surface libre [82, 42, 7, 72, 73]. Nous proposons un modèle qui se rapproche de l'étude de [39] et [73] étendue au cas d'un fluide de Herschel-Bulkley sans se placer explicitement dans le cadre de l'approximation de lubrification .

On considère un écoulement bidimensionnel sur un plan incliné, de pente θ d'un fluide incompressible de Herschel-Bulkley de densité ρ . La forme du front est modélisée par des équations de couche mince. Il s'agit des équations de Saint-Venant bidimensionnelles [89] déduites des équations fondamentales de l'hydrodynamique (Navier-Stokes) dans le cadre des approximations suivantes [47, 3] :

1. Approximation d'ondes longues ($\partial_x h \leq 1$) : cela implique notamment que les termes d'accélération verticale du fluide sont négligeables, ainsi que tous les gradients de contraintes visqueuses autres que $\partial_y \sigma_{xy}$. En particulier, cela implique que la pression au sein de la couche de fluide est partout localement hydrostatique (voir 2.1).
2. Approximation $\bar{u}^2 = \bar{u}^2$: il s'agit de ne pas prendre en compte les effets d'advection différentielle de quantité de mouvement dus à la non uniformité du profil de vitesse.

Équations de base du modèle

En considérant les approximations qui précèdent, les équations bidimensionnelles de Saint-Venant constituent un système dynamique couplé décrivant l'évolution de l'épaisseur h et de la vitesse horizontale moyennée dans l'épaisseur d'un écoulement à surface libre selon (voir la figure 2.3) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h\bar{u}) = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_b(\bar{u}, h)}{\rho h} \quad (2.10)$$

avec t le temps, x la coordonnée longitudinale, $\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u(y) dy$ et $\tau_b(\bar{u}, h)$ est la contrainte cisailante au fond de l'écoulement. L'équation 2.9 exprime la conservation de la masse de fluide et l'équation 2.10 exprime la conservation de la quantité de mouvement.

Pour fermer ce système d'équations, l'expression de τ_b doit être estimée. La contrainte basale, fonction des variables dynamiques $\bar{u}$ et h , dépend de la rhéologie du fluide. Dans le

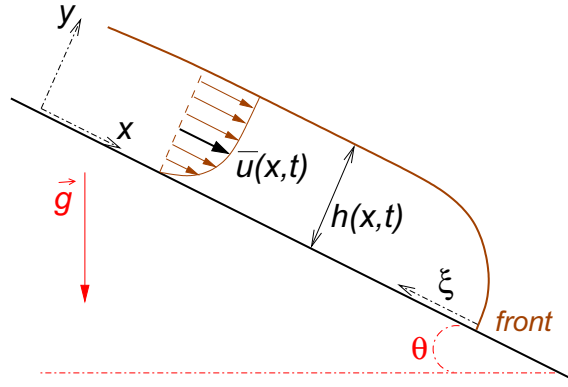


FIGURE 2.3 – Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley sur un plan incliné : notations (expressions 2.9 et 2.10).

cas d'un fluide de Herschel-Bulkley, l'expression de τ_b est décrite $\tau_b = \tau_c + k(\dot{\gamma}|_{y=0})^n$ doit être calculée numériquement [71, 17] en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{n}{n+1} \left(\frac{\tau_b}{k} \right)^{1/n} \left(\frac{n+1}{2n+1} + \frac{n}{2n+1} \frac{\tau_c}{\tau_b} \right) \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_b} \right)^{\frac{n+1}{n}} = \frac{\bar{u}}{h} \quad (2.11)$$

Résolution des équations de la forme du front : ondes progressives

Les équations de Saint-Venant admettent des solutions de type ondes progressives, de sorte que :

$$h(x, t) = H(\xi) \quad (2.12)$$

$$\bar{u}(x, t) = U(\xi) \quad (2.13)$$

avec $\xi = x - ct$ et c la vitesse de propagation du front (vitesse constante).

L'équation 2.9 fournit alors $U = cst = c$, alors que 2.10 permet d'obtenir une équation différentielle non-linéaire du premier ordre pour la forme de la surface libre :

$$\cot \theta \frac{dH}{d\xi} = 1 - \frac{\tau_b(c, H)}{\rho g H \sin \theta} \quad (2.14)$$

La contrainte $\tau_b(c, H)$ est donnée par la solution de l'équation 2.11.

Comportements asymptotiques

Au voisinage du front, le taux de cisaillement devient grand. On peut donc supposer que l'effet de la contrainte seuil sur l'écoulement devient négligeable. En d'autres termes, la loi de comportement de Herschel-Bulkley doit pouvoir être approximée par une simple loi de puissance ($\tau_c = 0$), et l'expression de la contrainte basale 2.11 se réduit donc à :

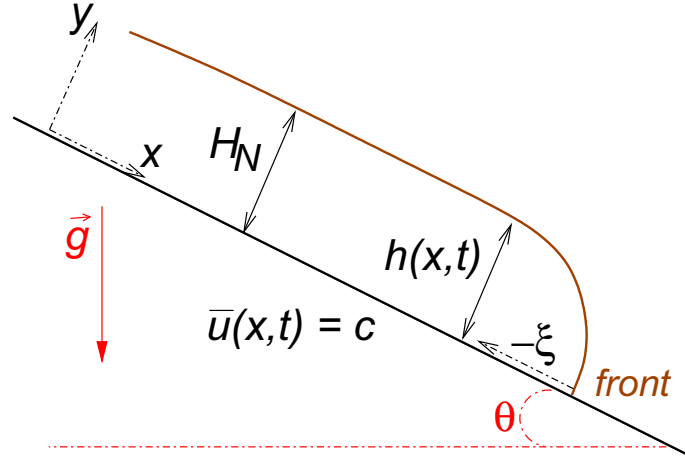


FIGURE 2.4 – Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley sur un plan incliné : notations (expressions 2.12 et 2.12).

$$\tau_b(\bar{u}, h) = \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n k \left(\frac{\bar{u}}{h} \right)^n \quad (2.15)$$

On obtient alors pour l'expression 2.15, la forme approchée suivante au voisinage du front :

$$\cot \theta \frac{dH}{d\xi} = 1 - \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n k \frac{c^n}{\rho g H^{n+1} \sin \theta} \quad (2.16)$$

Comme de plus $H \rightarrow 0$ au front, on peut écrire $\frac{dH}{d\xi} \propto \frac{-1}{H^{n+1}}$. Par intégration, on en déduit que $H \propto (-\xi)^{1/(n+2)}$ au front, pour $\xi \leq 0$. Ainsi, l'épaisseur de fluide décroît comme une loi de puissance dont l'exposant est inférieure à 1. Cet exposant est d'autant plus petit que $n \leq 1$ est proche de 1. Comme tous les modèles de type Saint-Venant incluant une dissipation visqueuse [41], ce modèle prédit donc un front singulier (vertical). Il convient toutefois de souligner qu'une telle prédiction est en contradiction avec l'hypothèse d'ondes longues ($\partial_x h \leq 1$) car on s'attendrait à ce que ce modèle perde sa validité très près du front.

Loin du front, à l'inverse, on s'attend à ce que la surface libre s'aplanisse, i.e. $dH/d\xi \rightarrow 0$. D'après l'équation 2.15, l'épaisseur dans cette zone uniforme est donc donnée par :

$$\tau_b(c, H) = \rho g H \sin \theta \quad (2.17)$$

Par définition, cette épaisseur dans la zone uniforme est donc égale à l'épaisseur normale H_N observée en régime permanent uniforme pour une vitesse moyenne c . En d'autres termes, l'écoulement à l'arrière du front peut être considéré comme étant en régime permanent et uniforme.

2.3 Particule isolée dans un fluide

2.3.1 Bilan de forces

Considérons le cas d'une sphère rigide de rayon R (diamètre δ) et de densité ρ_p en mouvement uniforme avec une vitesse u_p au sein d'un fluide newtonien incompressible de densité ρ et de viscosité dynamique μ . De plus, on considère le cas d'un fluide à *faible nombre de Reynolds* décrit par les équations usuelles de mécanique des fluides. La particule est soumise à des forces qui la maintiennent en équilibre ou provoquent son mouvement [49, 63, 53]. En appliquant le principe fondamental de la dynamique, le mouvement de la particule obéit à (voir la figure 2.5) :

$$m \frac{du_p}{dt} = F_G + F_D + F_{ma} + F_{RK} + F_S + F_B \quad (2.18)$$

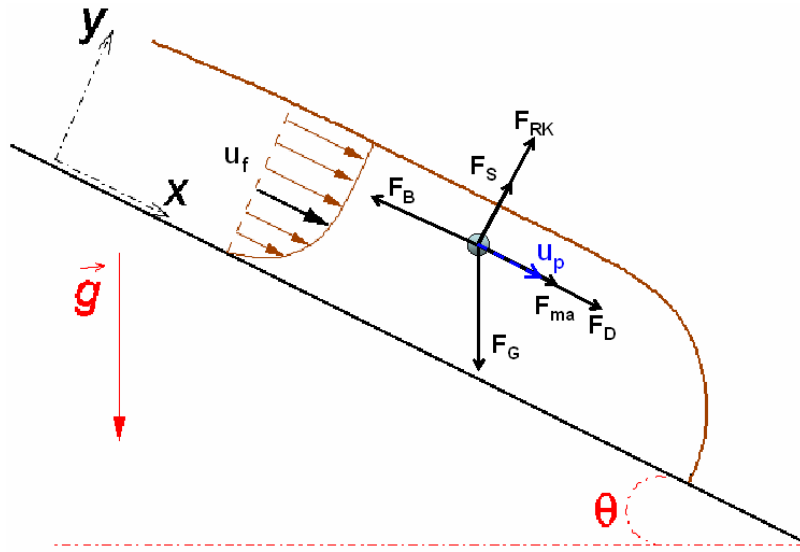


FIGURE 2.5 – Bilan des forces exercées sur une particule isolée dans un fluide : notations.

La force de gravité : F_G

La force de gravité ou poids apparent de la particule immergée dans un fluide de densité différente est telle que :

$$F_G = V_p g (\rho_p - \rho) \quad (2.19)$$

où V_p est le volume de la particule.

La force de frottement visqueuse : F_D

Dans un fluide Newtonien et aux faibles nombres de Reynolds¹, les termes d'inertie dans les équations de Navier-Stokes peuvent être considérés comme négligeables. La force de traînée

1. C'est-à-dire une faible vitesse relative entre le fluide et la particule

due à la différence de vitesse entre le fluide et la particule, elle s'exerce dans la direction de cette différence, selon l'expression de *Stokes* :

$$F_D = 3\pi\mu\delta U_r \quad (2.20)$$

où U_r est la vitesse relative² entre la vitesse locale du fluide u_f et celle de la particule u_p . L'expression de cette force est souvent écrite en ces termes :

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_r^2 \left(\frac{\pi\delta^2}{4} \right) \quad (2.21)$$

avec le coefficient sans dimension C_D pour une sphère fonction du nombre de Reynolds de la particule Re_p , tel que $C_D = \frac{24}{Re_p}$. [19] a rassemblé les nombreuses expressions, disponibles dans la littérature, pour prédire le coefficient de traînée C_D .

Dans le domaine de Stokes, les lignes de courant, qui sont régulières, contournent la sphère. Quand on augmente la vitesse d'écoulement et donc le nombre de Reynolds (≥ 1), deux tourbillons apparaissent près de la sphère en aval. A nombre de Reynolds plus grand, leur taille augmente et ils s'éloignent de la sphère.

Force de masse ajoutée : F_{ma}

Lorsqu'une particule subit une accélération dans un fluide, une masse additionnelle est incluse dans le bilan de forces de la particule. La masse virtuelle correspond à l'augmentation de l'inertie qui résiste à l'accélération. La différence entre cette masse virtuelle et la masse réelle est appelée *masse induite* ou la *masse ajoutée*. Cette masse virtuelle est un moyen de quantifier la force requise pour déplacer le fluide entourant la particule en accélération. La force de masse virtuelle s'écrit comme suit :

$$F_{ma} = C_{ma} a_{ma} \rho \quad (2.22)$$

où C_{ma} est le coefficient de masse ajoutée. Il est égal à 1/2 pour une particule sphérique isolée. L'expression d'accélération de la particule est a_{ma} . Cette force aura une importance relative d'autant plus grande que la densité de la particule est plus faible que la densité du fluide.

La force de *Rubinow-Keller* : F_{RK}

[63] décrit les forces latérales qui agissent sur une particule sphérique en étudiant les mécanismes de migration d'une particule isolée dans un fluide. Il considère le cas d'une particule animée d'un mouvement de rotation de sorte que l'axe de rotation ne coïncide pas avec la direction de translation. L'expression analytique de la force de *Rubinow-Keller*³ est valable uniquement dans le cas de faibles nombres de Reynolds dans un écoulement *infini* avec des effets inertiels faibles, telle que :

2. Vitesse de glissement

3. Force de Magnus

$$F_{RK} = \pi R^3 \rho \Omega \times u_f \quad (2.23)$$

où u_f est la vitesse du fluide et Ω est la vitesse angulaire de la particule.

La force F_{RK} est la force additionnelle de portance due à la rotation de la particule. Elle s'exerce dans la direction perpendiculaire au plan défini par l'axe de rotation de la particule et sa trajectoire.

Force de *Saffman* : F_S

La force de *Saffman* est la force de portance sous cisaillement (*slip-shear lift* en anglais). Elle est calculée perpendiculairement à la direction de l'écoulement, dans le cas d'une petite particule qui se déplace dans un écoulement infini, sous cisaillement simple. L'expression de F_S qui suit n'est valide que dans la limite des faibles Reynolds :

$$F_S = K R^2 \dot{\gamma}^{1/2} (\mu \rho)^{1/2} U_r \quad (2.24)$$

où K est une constante numérique ($K = 6.46$), $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement du fluide et U_r est la vitesse relative entre la particule et le fluide, mesurée sur la ligne de courant au centre de la particule.

Bien que *Saffman* ait retenu dans son analyse, les termes inertiels dans les équations de Navier-Stokes, l'écoulement n'est néanmoins pas dominé par ces effets.

Sous l'effet de cette force la particule va migrer vers les positions où la vitesse du fluide (par rapport à la vitesse de la particule) est la plus grande.

La force de *Saffman* est moins dominante que la force de traînée, néanmoins elle peut faire dévier la particule de sa trajectoire. Contrairement à la force de *Rubino-Keller* celle-ci est indépendante de la vitesse de rotation de la particule. La force de portance de *Rubino-Keller* est négligeable devant la force de *Saffman* dans le cas des faibles nombres de Reynolds.

Force d'histoire de *Basset* :

Une particule en accélération dans un fluide subit une force de masse ajoutée ainsi qu'une force de *Basset*. Cette dernière peut être considérée comme résultant du champ de viscosité créé par la particule en mouvement. Ce phénomène visqueux est décrit par les équations de diffusion et cela dans le champ d'écoulement à l'instant t en fonction de l'histoire entière du mouvement de la particule. Pour un écoulement laminaire autour d'une particule sphérique.

L'expression de *Basset* constitue une résistance instantanée de l'écoulement et peut être considérée comme une correction de la traînée visqueuse en transitoire. Son expression est limitée à la situation d'une particule subissant une forte accélération à de faibles vitesses.

2.3.2 Critère de stabilité

[19] décrit un critère de stabilité d'une particule dans un fluide à seuil :

$$Y = \frac{\tau_c}{(\rho_p - \rho)g\delta} \quad (2.25)$$

La précision de détermination de ce nombre sans dimension est directement liée à la détermination de la valeur du seuil de contrainte du fluide. Une revue de ce critère dans la littérature [19] répertorie des valeurs de Y . La majorité des études ont porté sur des fluides newtoniens. Les études sur les fluides non-newtoniens, notamment des fluides de Herschel-Bulkley, sont essentiellement numériques. Les valeurs vont de 0.048 à 0.212. La valeur supérieure est calculée au moment où toute la surface de la particule n'est pas cisailée. [50] ont étudié la chute de particules de forme sphérique et cylindrique dans du carbopol. Ils ont montré que les objets de forme cylindrique de surface lisse induisent des valeurs du nombre Y plus faibles. Autrement dit, la forme cylindrique montre plus de résistance dans le cas des surfaces lisses. Par ailleurs, les auteurs ont calculé une valeur de Y de 0.099 pour des particules sphériques lisses et de 0.058 pour des particules sphériques rugueuses.

2.3.3 Vitesse limite de chute dans un fluide :

D'un point vu théorique, il est difficile de trouver une formulation de chute de corps dans un fluide à seuil. C'est pour cela que l'on utilise l'expression de la vitesse de chute d'une particule de densité dans le cas d'un *fluide newtonien*.

Une particule rigide de forme sphérique, de rayon R et de densité ρ_p , soumise à l'action de son propre poids, de la force de traînée et de la poussée du fluide, chute dans un fluide newtonien au repos (avec une densité ρ et une viscosité dynamique μ) selon une vitesse limite de chute décrite par :

$$u_s(y) = \frac{2}{9}(\rho_p - \rho)gR^2 \frac{1}{\mu(y)} \quad (2.26)$$

où $\mu(y)$ est la viscosité dynamique locale du fluide à une position y dans l'écoulement. Elle est calculée à la position y qui désigne le centre de gravité de la particule de sorte que :

$$\mu(y) = \tau_{xy}/\dot{\gamma}(y) \quad (2.27)$$

avec τ_{xy} étant la contrainte cisailante et $\dot{\gamma}(y)$ le taux de cisaillement (voir 3.4).

L'expression du taux de cisaillement en toute position y est la suivante :

$$\dot{\gamma}(y) = \left[\left(\frac{\rho g \sin \theta h_0}{K} \right) \left(1 - \frac{y}{h_0} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.28)$$

Finalement, la viscosité dynamique calculée au centre de la particule s'exprime comme suit :

$$\mu(y) = (\rho g \sin \theta)^{\frac{n-1}{n}} \left(\frac{k}{h_0} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{H_N - y}{\left(1 - \frac{y}{h_0} \right)^{\frac{1}{n}}} ; \text{ si } y < h_0 \quad (2.29)$$

Chapitre 3

Matériaux modèles

3.1 Matériaux mis en œuvre

Les laves torrentielles sont des coulées gravitaires composées d'un mélange d'eau et d'une large gamme granulométrique comprenant des tailles allant des particules d'argile aux blocs métriques [1, 47]. Dans cette partie, on s'intéresse en particulier à la matrice boueuse des coulées, c'est à dire au fluide interstitiel composé d'eau et de particules fines colloïdales. Le comportement de cette matrice est généralement décrit dans la littérature par un modèle de fluide viscoplastique [61, 28, 37]. Il est donc nécessaire d'identifier des fluides modèles nous permettant d'étudier les propriétés de cette matrice, au laboratoire, en conditions contrôlées. Pour ce faire, il nous faut un ou plusieurs *matériaux modèles* possédant des propriétés viscoplastiques. De plus, il convient de choisir un matériau dont les propriétés restent stables sur la durée de l'expérience, et qui soit facile à préparer et à manipuler. Enfin, l'idéal serait que ce matériau modèle soit transparent afin de pouvoir visualiser les écoulements localement.

Pour nos expériences nous avons sélectionné deux fluides modèles : le carbopol et le kaolin. Le rapport entre la hauteur de l'écoulement expérimental, H_{mod} et la hauteur moyenne des coulées naturelles, H_{nat} est de l'ordre de $1/50$ [2]. La gamme des propriétés rhéologiques des matériaux modèles a été choisie en conséquence sur la base des critères de similitudes décrit dans la partie 1.2.2 et en prenant en compte les densités de ces matériaux. En particulier le seuil de contrainte des matériaux modèles retenus est de l'ordre de 10 Pa. En général, le critère de similitude sur la consistance k ne peut être pleinement respecté en raison de l'existence d'une interdépendance entre les grandeurs τ_c et k , pour un matériau donné. Quant à l'indice d'écoulement n , il dépend lui aussi des matériaux modèles, mais sa valeur reste néanmoins proche de la valeur classiquement retenue pour les laves torrentielles réelles ($1/3$) [23].

Le carbopol : Le carbopol est un acide polyacrylique commercial [90, 69]. Depuis les années 1950, il est sous ses différentes formes, l'agent gélifiant et épaississant le plus utilisé dans l'industrie (produits pharmaceutiques, cosmétiques, détergents). Il possède des propriétés rhéologiques élastoviscoplastiques [59, 80, 14, 69, 76], il est peu thixotrope [51]. Il est structuellement homogène à l'échelle d'observation, facile à préparer, chimiquement non agressif et stable à long terme. Enfin il est translucide et se prête à l'observation directe.

D'un point de vue microstructurel, le carbopol est décrit comme un microgel [16, 90, 14, 69, 76], c'est à dire une suspension concentrée de particules réticulées qui individuellement sont gélifiées. Cette microstructure se forme au delà d'une concentration, d'une force ionique et d'un pH données [67]. Lorsque la poudre de carbopol est dispersée dans l'eau, avec des concentrations massiques jusqu'à 2 %, il se forme une solution visqueuse avec un pH faible. La neutralisation par un agent alcalin provoque une ionisation le long du squelette du polymère. Les répulsions électrostatiques résultantes conduisent au déroulement et à l'expansion des chaînes réticulées du carbopol. Ceci provoque finalement le gonflement du polymère et la formation d'un gel ferme et transparent.

Nous avons choisi d'employer pour nos expériences une gamme de carbopol, dont le nom industriel est le carbopol ETD 2623 [67]. Il se présente sous l'aspect d'une poudre blanche volatile. En plus de posséder tous les avantages attribués au carbopol [88], ce polymère est peu sensible à l'environnement ionique et minéral. Cette propriété est essentielle, compte tenu des contaminations (ions, minéraux, poussières, ...) qui surviennent lors des processus de préparation, de stockage et d'expérimentation auxquels sont soumis nos échantillons.

Le kaolin : Le kaolin est une argile blanche et friable qui résulte principalement de l'altération superficielle ou hydrothermale de roches magmatiques [40]. Elle est formée surtout de kaolinite qui se présente sous la forme de feuillets de l'ordre du nm. Au delà d'une concentration limite dans l'eau, ce matériau développe un seuil de contrainte, les effets élastiques restant moins prononcés que ceux du carbopol [21, 48, 15]. En revanche, il est opaque rendant impossible l'accès direct aux grandeurs internes des écoulements. Pour nos essais, nous avons sélectionné une argile finement concassée issue des carrières d'*Hostun* près de Grenoble. Bien qu'il soit opaque, ce matériau offre autant d'avantages que le carbopol. Cette argile naturelle a fait l'objet de nombreuses études [21, 48, 15] dans la caractérisation des écoulements géophysiques et industriels.

3.2 Protocoles de préparation des matériaux

3.2.1 Protocole de préparation du carbopol ETD 2623

Les solutions de carbopol ont été préparées avec une concentration massique de 0.1 %. Nous avons systématiquement préparé de grands volumes de solution, entre 30 et 60 litres, à température ambiante (de 15 à 25°C) en utilisant de l'eau déminéralisée garantissant une composition chimiquement stable. La masse volumique des solutions préparées est de 1000 kg.m^{-3} . Lors de cette phase, nous avons veillé à obtenir des échantillons homogènes sans agrégats et en minimisant l'incorporation de bulles d'air. La solution est préparée en utilisant un agitateur motorisé fixé solidement au droit du réservoir contenant la solution (voir la figure 3.1). L'étape de préparation comporte deux phases, dont chacune est associée à un outil d'agitation adapté.

La première phase consiste à disperser la poudre de carbopol en la tamisant au dessus du réservoir d'eau. La poudre est préalablement étuvée dans un four à une température de 80°C durant 24 heures. La solution ainsi obtenue est agitée au moyen d'un outil consistant en une turbine radiale tournant à grande vitesse (800 tour/minute) pour générer un vortex (outil 1 sur la figure 3.1). Après incorporation de toute la masse de poudre de carbopol, on continue

à cisailer fortement le mélange ainsi obtenu sur une durée de 24 heures afin d'assurer une dispersion optimale de la poudre et obtenir une solution visqueuse homogène. Par la suite, on cisaille la préparation à vitesse plus faible (environ 400 tour/minute), durant 24 heures, afin d'expurger la solution des bulles d'air. Enfin, la solution est laissée au repos sur une durée typique de quelques heures.

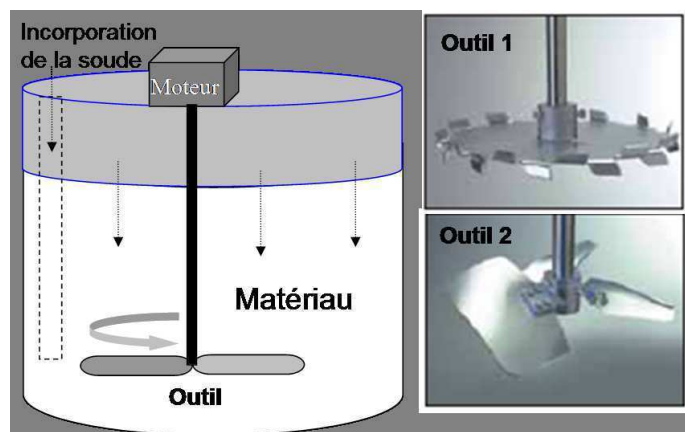


FIGURE 3.1 – Dispositif de préparation de la solution de carbopol.

La seconde phase consiste à neutraliser la solution de carbopol par une solution de soude (1 mole/litre) pour obtenir un pH d'environ 8. Le volume de soude requis¹ est incorporé en plusieurs points du réservoir, le mélange étant assuré par un outil adapté tournant à 400 tour/minute². On utilise pour cette phase, un mobile à pâles profilées (outil 2 sur la figure 3.1), muni de petites surfaces de contact avec le fluide. Ce mobile est bien adapté pour opérer en milieu visqueux et permet l'homogénéisation relativement rapide de tout le volume du réservoir. Suite à l'incorporation de la soude, la solution acquiert un aspect trouble puis devient de plus en plus épaisse et visqueuse jusqu'à obtenir un gel homogène et translucide, au bout d'environ une heure d'agitation. Enfin, la solution est laissée au repos 24 heures durant lesquelles les chaînes de carbopol se déroulent et s'allongent de façon optimale [67, 69] de façon à obtenir un fluide à seuil homogène prêt à l'emploi. Lorsque cela est nécessaire, on soumet de nouveau le mélange à une agitation modérée (moins de 400 tour/minute) durant 24 heures, afin de réduire la quantité de bulles d'air.

Malgré tout le soin apporté à ces phases de préparation, les solutions obtenues présentent des propriétés rhéologiques différentes. Il n'est notamment pas possible de prédéterminer le seuil de contrainte qu'aura la solution finale. Cette variabilité est due à la sensibilité du carbopol à la pollution aux agents extérieurs, et au fait que même si globalement la préparation est effectuée de la même manière, des variations à petites échelles dans le protocole sont inévitables. Pour nos expériences, nous avons tiré partie de cette variabilité, puisqu'elle nous a permis de mener des expériences sur des solutions avec des propriétés rhéologiques différentes, avec des seuils de contrainte allant de 7 à 25 Pa.

1. 10 ml de soude par litre d'eau pour une concentration de 1 g de poudre de carbopol par litre d'eau.

2. Lors de cette phase, un cisaillement trop intense conduit à une destruction irréversible des chaînes de polymère.

3.2.2 Protocole de préparation du kaolin

Les solutions de kaolin ont été préparées, à température ambiante, en mélangeant l'argile concassée à de l'eau déminéralisée. La concentration volumique de la préparation est de 24 % (concentration massique : 44 %). Ceci correspond à des masses volumiques des mélanges eau-kaolin, de 1363 à 1448 kg.m⁻³. Le protocole de préparation est plus simple que pour le carbopol, il consiste à ajouter progressivement du kaolin et de le disperser avec un agitateur, fixé au dessus du réservoir contenant le mélange. L'outil d'agitation est un mélangeur généralement utilisé pour les peintures. Dans un premier temps, on applique des vitesses d'agitation modérées (de l'ordre de 400 tour/minute), durant environ 10 minutes, afin de permettre l'imbibition du matériau. Par la suite le mélange est soumis à un cisaillement fort durant 10 minutes avant d'ajouter à nouveau du kaolin et de recommencer le cycle d'agitation. Une fois que la totalité du kaolin est incorporée, le mélange continue à être soumis à une agitation forte (800 tour/minute) durant environ une heure puis est laissé au repos. Avant d'entamer un essai, le matériau est cisailé de nouveau, avec des vitesses de 400 à 600 tour/minute, et ce durant environ une heure.

3.3 Caractérisation rhéologique des fluides

3.3.1 Détermination de la courbe d'écoulement

L'objectif des essais décrits dans cette partie est la détermination de la courbe d'écoulement en régime permanent des matériaux étudiés, c'est-à-dire la relation liant la contrainte cisailante et le taux de déformation. Les différentes techniques et protocoles utilisés pour la détermination au laboratoire de telles courbes d'écoulement sont largement documentés dans la littérature [58, 59, 21, 60, 80, 57, 25, 88]. Nous nous contenterons ici de récapituler les principaux paramètres utilisés dans nos essais.

Les matériaux préparés étant homogènes à notre échelle d'observation, on peut considérer que les essais réalisés sur des échantillons de petit volume (de 1 à 6 cm³) sont représentatifs du comportement mécanique du matériau global. Nous avons systématiquement réalisé des essais sur des échantillons prélevés sur le tapis au terme de chaque essai. Dans certains cas (uniquement pour le carbopol) nous avons également réalisé des essais sur des échantillons prélevés dans le réservoir de stockage des matériaux, avant l'essai sur le canal (voir la partie 5). Ces deux lots d'échantillons sont représentatifs de l'état du matériau avant et après cisaillement dans le canal³.

La caractérisation rhéologique des deux matériaux modèles a été réalisée avec un rhéomètre commercial (Bohlin - CVOR) rotatif muni d'une géométrie plan - plan (Figure 3.2) composée de deux disques coaxiaux en acier inoxydable. L'outil inférieur qui fait office d'embase est fixe. L'outil supérieur, mobile, est couplé à un moteur permettant d'imposer soit un couple C , soit une vitesse de rotation Ω (via un système d'asservissement). Pour nos essais, nous avons choisi de travailler à vitesse de rotation imposée.

Les données de sortie du système de mesure du rhéomètre sont le couple C et la vitesse angulaire Ω , qu'il convient ensuite de convertir en contrainte cisailante τ et en taux de cisaille-

3. Dans tout ce qui suit, on retiendra les mentions *av* et *ap*.

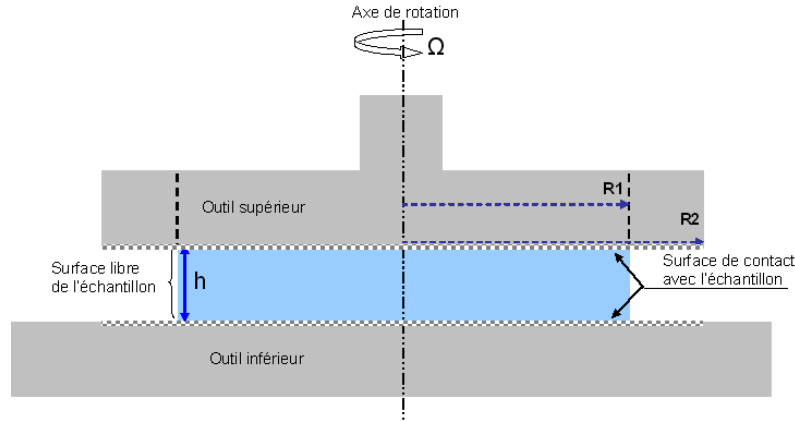


FIGURE 3.2 – Représentation schématique du rhéomètre rotatif utilisé pour les mesures : il est possible de faire varier la taille de l'entrefer h et/ou le diamètre ($\phi_i = 2R_i$) de l'outil supérieur $\phi_1 = 40 \text{ mm}$ ou $\phi_2 = 60 \text{ mm}$. Le diamètre de l'outil inférieur est fixe, $\phi_2 = 60 \text{ mm}$.

ment $\dot{\gamma}$. La géométrie plan-plan utilisée induit des variations du gradient de vitesse au sein de l'échantillon en fonction de la distance par rapport à l'axe central. Cependant, localement, l'écoulement est dans une configuration de cisaillement simple (écoulement viscosimétrique [25]). Le taux de cisaillement local est alors relié à la vitesse de rotation selon :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega r}{h}, \quad (3.1)$$

où r représente la distance à l'axe central et h la taille de l'entrefer. La contrainte cisailante à la périphérie de l'échantillon ($r = R$) s'obtient, quant à elle, selon la relation suivante [25] :

$$\tau(\dot{\gamma}_R) = \frac{3C}{2\pi R^3} + \frac{\dot{\gamma}_R}{2\pi R^3} \frac{dC}{d\dot{\gamma}_R} \quad (3.2)$$

Le deuxième terme de cette relation proportionnel à $dC/d\dot{\gamma}_R$ (terme correctif lié à l'hétérogénéité du taux de cisaillement dans l'échantillon) est généralement faible devant le premier. Il n'est toutefois pas négligeable, et nous le prenons donc en compte dans nos calculs de conversion. Pour estimer correctement la dérivée intervenant dans ce terme, il est nécessaire de disposer d'un échantillonnage suffisamment fin de la courbe d'écoulement.

3.3.2 Paramètres des essais de rhéométrie

Taille de l'entrefer

Pour que l'hypothèse de fluide homogène et de milieu continu soit valide, la taille de l'entrefer h doit être supérieure à au moins *dix fois* la taille des plus grandes structures présentes dans le matériau [26]. Concernant le kaolin, il est généralement considéré que la taille caractéristique pertinente est celle du feuillet, de l'ordre du nano mètre [24]. Pour le carbopol, il semble que l'échelle de la microstructure soit plutôt de l'ordre du micro mètre [69, 76, 54]. Par ailleurs, avec notre rhéomètre et les matériaux utilisés, nous ne pouvons envisager des épaisseurs d'échantillons supérieures à quelques millimètres car cela conduirait à des artefacts

expérimentaux trop importants (3.3.3). En concordance avec ces limites, nos essais ont été réalisés en utilisant des tailles d'entrefer h variant entre 1 et 2 mm.

Protocole de cisaillement

Mode de cisaillement : Les courbes d'écoulement des deux fluides ont été déterminées en utilisant un protocole de paliers de taux de cisaillement. Les paramètres à choisir pour ce mode opératoire sont la gamme de taux de cisaillement explorée, le nombre de paliers et la durée de chaque palier. Concernant les taux de cisaillement, nous avons généralement limité nos mesures dans la gamme⁴ allant de 10^{-3} s^{-1} à 10^2 s^{-1} , en utilisant souvent 30 paliers.

Durée des paliers : La durée des paliers est essentiellement conditionnée par la nécessité d'obtenir des mesures en régime permanent. Aussi, la durée du palier doit-elle être supérieure au temps de réponse caractéristique du matériau étudié. Pour estimer ce temps de réponse, nous avons réalisé un certain nombre d'essais en mode de contrainte cisailante imposée et constante. Les niveaux de contrainte choisis sont supérieurs mais proches de la contrainte-seuil, car c'est dans ce domaine que l'on peut s'attendre à obtenir les temps de réponse les plus importants [31]. Le taux de cisaillement résultant est alors enregistré en fonction du temps (figures 3.3 et 3.4). On observe sur ces figures que pour le carbopol comme pour le kaolin, les temps de réponse mesurés sont de l'ordre de 10 secondes. Par conséquent, nous avons choisi pour les paliers une durée de 15 secondes, la mesure étant faite dans les 5 dernières secondes.

Pour valider le protocole utilisé, nous représentons sur les figures 3.5 (carbopol) et 3.6 (kaolin) les courbes d'écoulement obtenues par paliers de cisaillement ainsi qu'un certain nombre de points correspondant à des essais à contrainte imposée réalisés sur les mêmes matériaux (les mesures correspondant dans ce cas à des moyennes réalisées au-delà du temps de réponse du matériau). On vérifie ainsi que la durée choisie pour les paliers est effectivement suffisante pour obtenir des courbes d'écoulement en régime permanent, y compris pour des valeurs de contrainte proches du seuil.

Enfin, signalons par ailleurs que la durée totale d'un essai ne doit pas être trop grande au risque d'être soumis à des artefacts expérimentaux trop importants (voir en partie 3.3.3). Dans nos expériences, cette durée limite est typiquement de l'ordre de quelques minutes pour les deux matériaux testés. La durée des paliers que nous avons choisie nous permet de rester dans cette limite.

Sens du cisaillement par paliers : Les paliers de cisaillement appliqués à l'échantillon peuvent correspondre à des niveaux de sollicitation croissants ou décroissants. Les figures 3.7 et 3.8 nous montrent que dans la gamme⁵ de $\dot{\gamma}$ de 5.10^{-2} s^{-1} à 10^2 s^{-1} , les courbes d'écoulement obtenues en sollicitation croissante et décroissante sont confondues. Par contre, elles s'écartent sensiblement dans la gamme des faibles taux de cisaillement. Cette différence est due au comportement solide, élasto-plastique, du matériau en dessous du seuil d'écoulement. Compte tenu du comportement complexe des matériaux en-dessous du seuil, nous avons choisi

4. Cette gamme a été choisie en cohérence avec les taux de cisaillement subis par les matériaux dans le canal expérimental.

5. Cette gamme dépend des paramètres d'essai, notamment de la durée choisie pour les paliers.

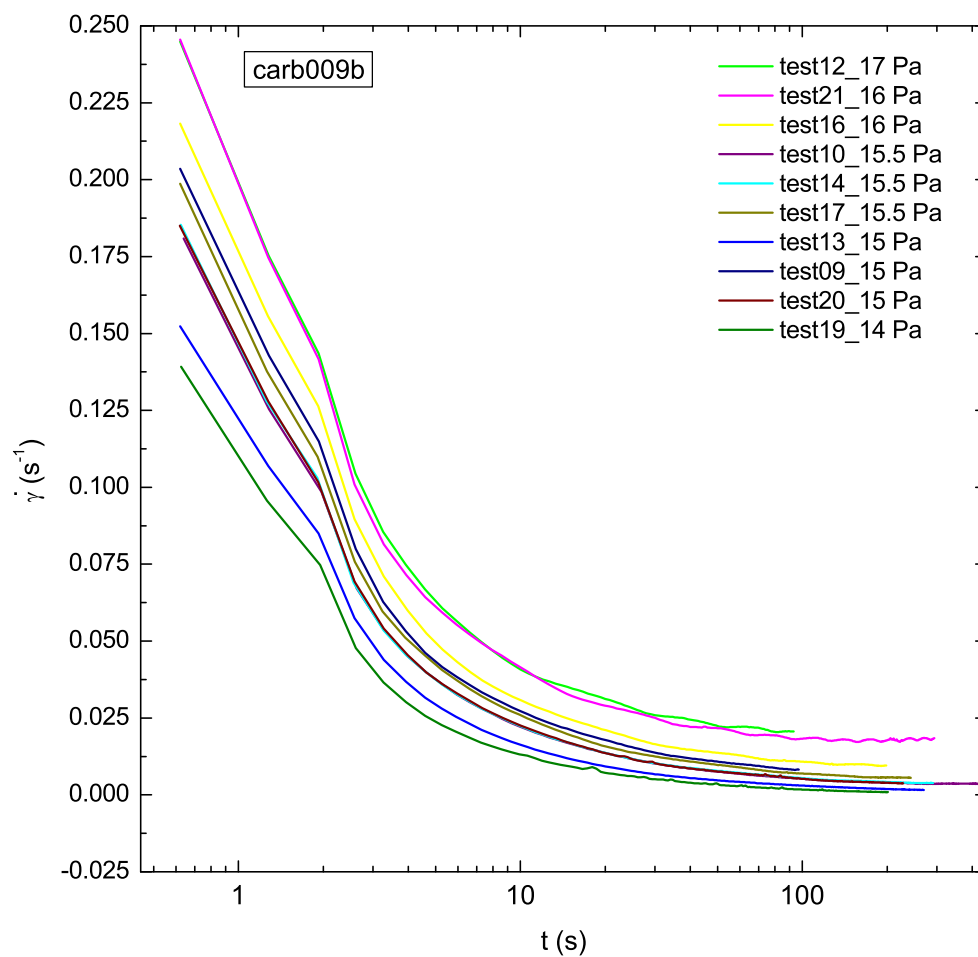


FIGURE 3.3 – Évolution du taux de cisaillement en fonction du temps pour différents niveaux de contrainte, pour une solution de carbopol (*carb009b*) (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).

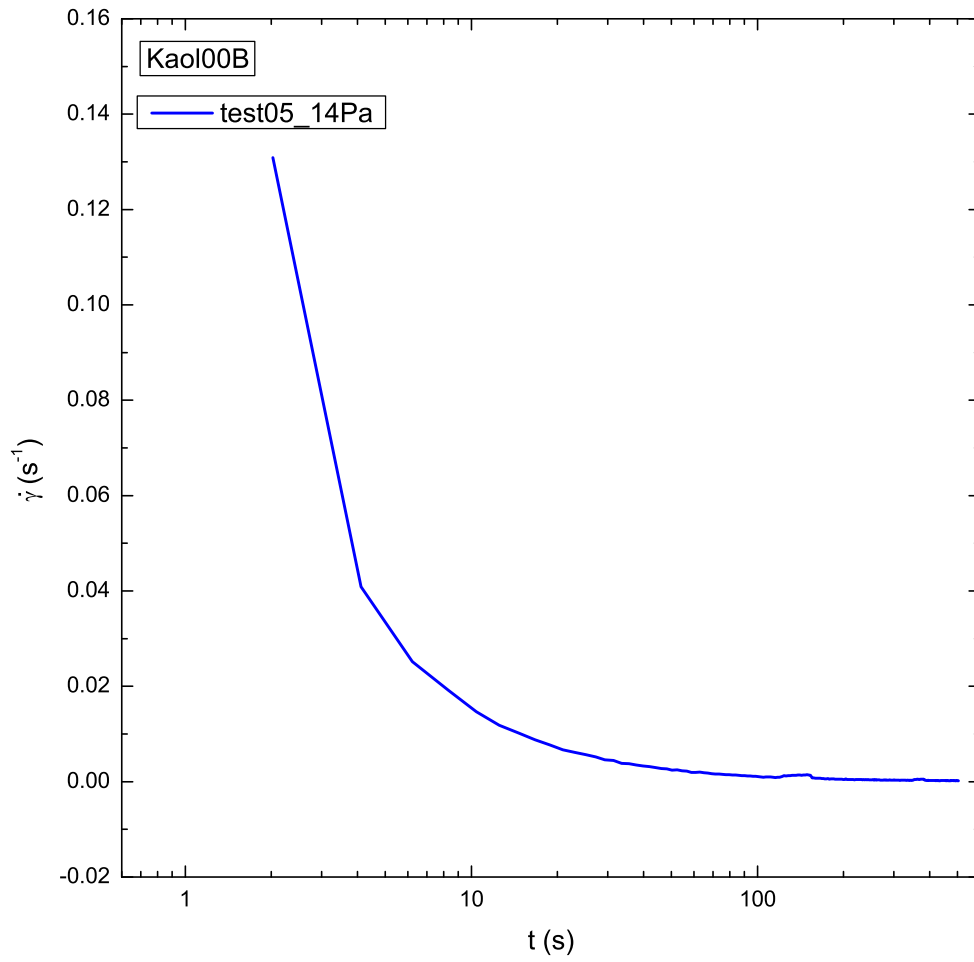


FIGURE 3.4 – Évolution du taux de cisaillement en fonction du temps pour une contrainte imposée de 14 Pa, pour une solution de kaolin *kaol00B* (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).

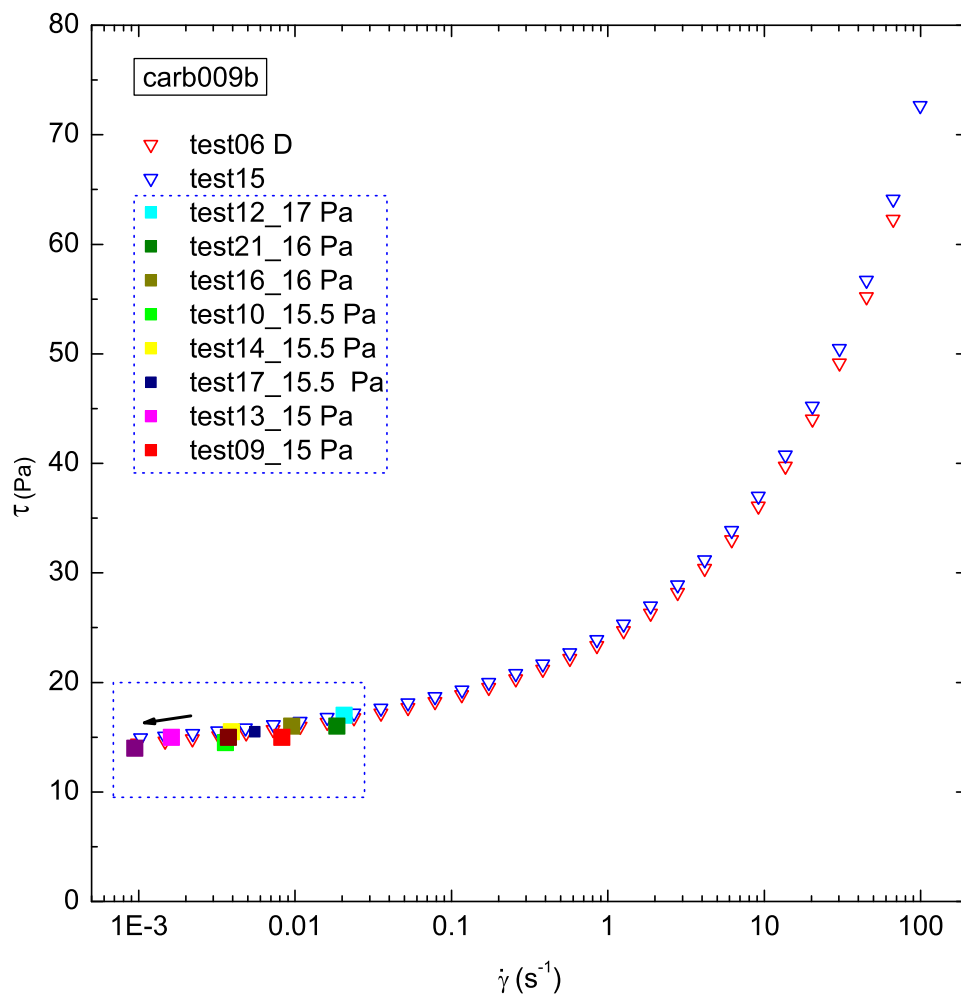


FIGURE 3.5 – Courbes d'écoulement d'une solution de carbopol obtenues par mode de paliers décroissants (*test06 D* et *test15*). Les points individuels correspondent à des essais à contrainte constante, les mesures étant prises au-delà du temps de réponse du matériau (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).

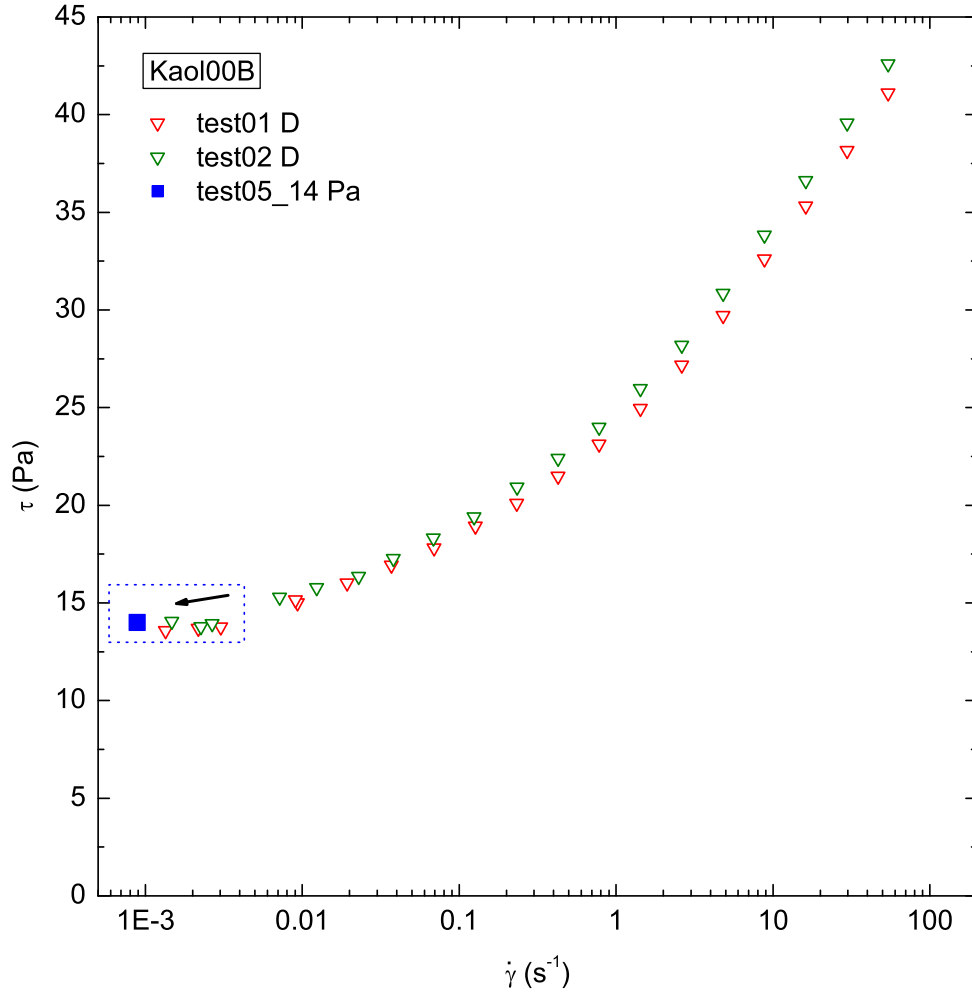


FIGURE 3.6 – Courbes d'écoulement d'une solution de carbopol obtenues par mode de paliers croissants *test01 C* puis décroissants *test01 D*. Un essai à contrainte constante est représenté par un point unique obtenu en moyennant le taux de cisaillement au delà du temps de réponse du matériau (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).

d'opérer avec des paliers de sollicitations décroissantes permettant de rester en régime liquide.

Répétition des essais de rhéométrie : Pour chaque échantillon de carbopol, chaque essai est réalisé deux fois à la suite. On constate que les résultats obtenus lors des deux répétitions sont quasiment identiques. Cependant on observe systématiquement une légère diminution des propriétés rhéologiques lors du deuxième essai (voir l'exemple du carbopol *carb000*, illustré en annexe sur le tableau C.1). Dans la suite, les paramètres retenus correspondront toujours au deuxième essai. Par contre, pour le kaolin, on ne réalise pas de répétition à cause des phénomènes de sédimentation et de creusement importants qui apparaissent au cours du temps.

Précisaillement : Avant chaque essai, on applique un précisaillement à taux de cisaillement imposé de 50 s^{-1} pendant 20 secondes, suivi d'un temps de repos de 10 secondes. Ce procédé permet de conférer aux échantillons un état initial reproductible d'un essai à l'autre.

Température : Nos essais sont réalisés à température constante, celle-ci étant théoriquement régulée avec une précision du dixième de degré. Toutefois, pour des raisons pratiques, les échantillons ne sont pas recouverts de la cloche de protection destinée à limiter l'interaction avec l'air ambiant, ce qui limite l'efficacité du contrôle de la température. En effet, il s'est avéré nécessaire d'observer directement l'état de la surface libre tout au long des essais (notamment pour constater le creusement). Les températures utilisées durant les essais rhéométriques sont les mêmes que celles qui régnaient dans le laboratoire au moment des essais sur le canal expérimental. Ces températures ont varié dans la gamme 15°C à 25°C .

3.3.3 Phénomènes perturbateurs des mesures de rhéométrie :

Les mesures de rhéométrie sont susceptibles d'être affectées par de nombreux artefacts expérimentaux [26, 25]. Nous discutons ci-dessous les principaux phénomènes perturbateurs qui peuvent intervenir dans nos essais, en évaluant leur influence sur les courbes d'écoulement mesurées.

Notons que pour la plupart de ces phénomènes, leur influence dépend du rapport entre la surface cisailée et le volume de l'échantillon. Ainsi, varier la géométrie des échantillons permet d'apprécier directement l'éventuelle apparition de ces artefacts. Pour cela, nous réalisons systématiquement, pour chaque matériau testé, des essais avec au moins deux tailles d'entrefer différentes et deux diamètres d'outils.

Effets de bords :

Dans la géométrie plan-plan, la surface libre de l'échantillon est en théorie cylindrique de révolution autour de l'axe des disques. Toutefois, différents effets peuvent conduire à une déformation de cette surface libre. Cela conduit alors à des erreurs dans les calculs de la contrainte et du taux de cisaillement, qui peuvent être très importantes puisque τ est proportionnel à R^{-3} (équation 3.2).

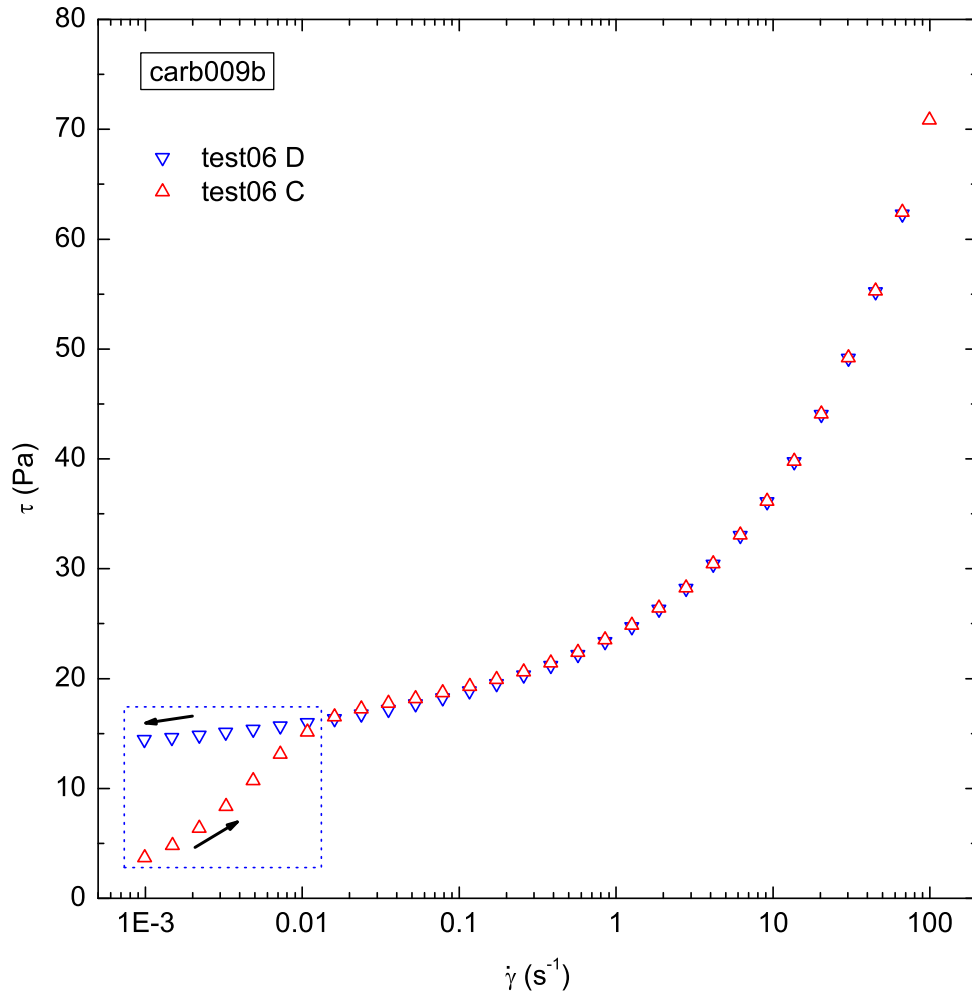


FIGURE 3.7 – Courbes d'écoulement pour une solution de carbopol obtenues par mode de paliers croissants *test06 C* puis décroissants *test06 D* (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).

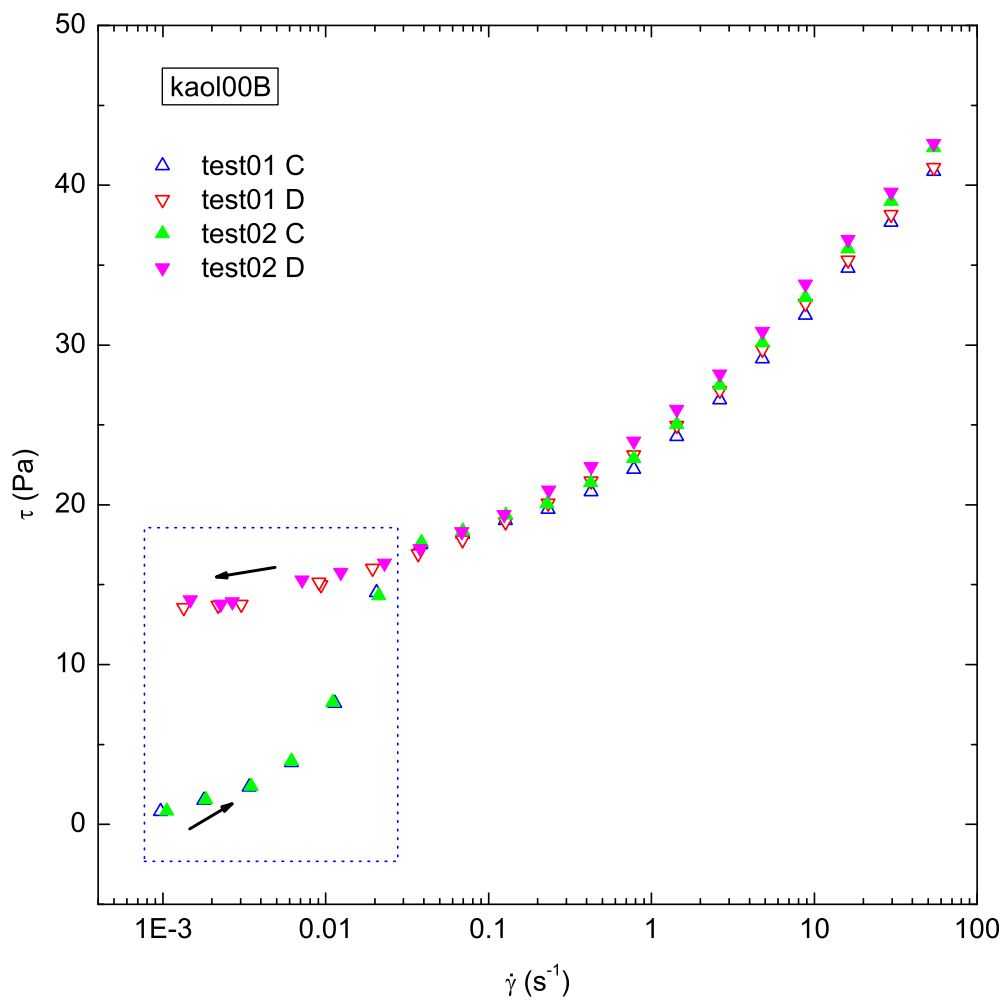


FIGURE 3.8 – Courbes d'écoulement pour une solution de kaolin obtenues par mode de paliers croissants *test01 C* puis décroissants *test01 D*, avec répétition pour chaque cas (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).

Préparation de l'échantillon : La préparation de l'échantillon comporte une phase de mise en forme de la surface libre de l'échantillon (raclage du surplus de matériau). Cette phase doit être réalisée très soigneusement. Dans notre, nous avons observé que l'état initial de la surface libre était généralement plus régulier avec l'outil supérieur de diamètre 60 mm qu'avec l'outil de 40 mm. En effet, l'échantillon est plus facile à mettre en place lorsque les deux disques ont des diamètres identiques. De ce fait, les résultats avec un outil supérieur de 60 mm ont été privilégiés dans l'interprétation et l'analyse des données rhéométriques.

Creusement : Il apparaît souvent à la surface libre de l'échantillon un phénomène de creusement évolutif. Ce phénomène conduit à la formation de zones rigides à la périphérie de l'outil et à la réduction du rayon de l'échantillon cisailé. D'après les expressions (3.2) et (3.1), le creusement conduit donc à sous estimer les mesures de viscosité du matériau. Dans notre cas, nous avons observé que ce phénomène reste modéré compte tenu des protocoles de mesures utilisés, notamment le choix de l'entrefer et la durée limitée des essais.

Phénomène de glissement aux parois

On parle de glissement lorsque le fluide n'adhère pas à la surface de l'outil qui applique le cisaillement sur l'échantillon [91, 90, 84, 75]. Il en résulte que le rhéomètre mesure une contrainte plus faible pour une valeur donnée de taux de cisaillement, de sorte que la valeur apparente de viscosité est également sous-estimée.

Pour limiter l'apparition de ce phénomène, nous avons employé dans nos expériences des outils rugueux [76]. La taille caractéristique des rugosités est de l'ordre de quelques dizaines de micro mètre. Notons qu'afin de ne pas perturber l'écoulement, ces rugosités doivent rester inférieures au dixième de la taille de l'entrefer [4], ce qui est bien le cas dans nos essais.

3.3.4 Détermination des paramètres rhéologiques

Méthode

Le comportement mécanique des deux matériaux utilisés est généralement bien modélisé par une loi rhéologique de Herschel-Bulkley [59, 21]. Cette loi de comportement relie la contrainte cisailante τ appliquée à l'échantillon en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ sous la forme suivante :

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{si } \tau < \tau_c, \quad (3.3)$$

$$\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n \quad \text{si } \tau > \tau_c, \quad (3.4)$$

avec τ_c la contrainte seuil, k la consistante, et n l'indice d'écoulement. Pour chaque échantillon, ces paramètres rhéologiques sont déterminés par une procédure d'ajustement non-linéaire à trois paramètres.

Les courbes d'écoulement obtenues en régime permanent pour nos expériences sont en annexe A pour le carbopol et en annexe B pour le kaolin et les paramètres qui correspondent aux ajustements illustrés sur ces figures sont en annexe C pour le carbopol et en annexe D pour le kaolin.

Par d'exemple, les figures 3.9 et 3.10 montrent les rhéogrammes obtenus pour un échantillon de carbopol *carb000* et un échantillon de kaolin *kalo027*. Les valeurs des paramètres rhéologiques obtenus par ajustement selon la loi de Herschel-Bulkley sont indiquées dans la légende de ces figures.

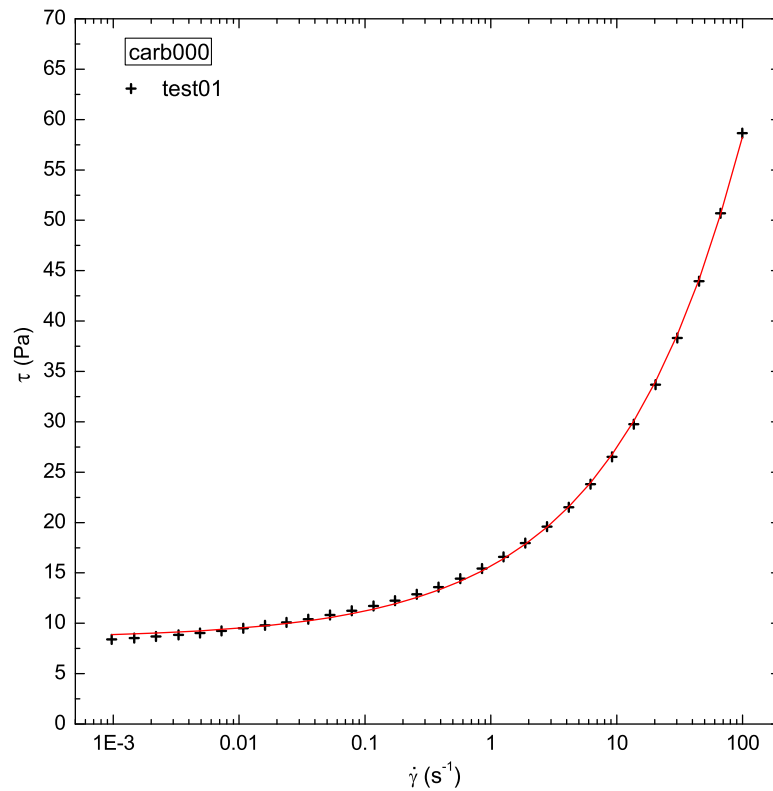


FIGURE 3.9 – Rhéogramme pour un échantillon de carbopol : les points de données indiquent les mesures, les lignes continues représentent l'ajustement de la totalité de ces mesures expérimentales selon une loi de Herschel-Bulkley. Les paramètres rhéologiques obtenus pour le *test01* du carbopol *carb000* sont : $\tau_c = 8.49$ Pa, $k = 7.18$ Pa.s ^{n} , $n = 0.421$.

Le tableau 3.1 récapitule les gammes des paramètres d'ajustement des courbes d'écoulements, obtenus avec nos expériences avec du carbopol et du kaolin (voir les annexes C et D). On constate notamment que les valeurs des indices d'écoulement n sont quasi-constantes pour chaque matériau ; respectivement 0.4 pour le carbopol et 0.2 pour le kaolin. On note aussi que

matériau	τ_c (Pa)	k (Pa.s ^{<i>n</i>})	n
Carbopol	[7.04 ;23.77]	[6.04 ;12.95]	[0.371 ;0.428]
Kaolin	[2.69 ;23.16]	[10.45 ;30.40]	[0.154 ;0.200]

TABLE 3.1 – Gamme de variation des paramètres d’ajustement de Herschel-Bulkley pour les échantillons de carbopol et de kaolin.

Paramètres	τ_c (Pa)	k (Pa.s ^{<i>n</i>})	n
Écart type $e_{p,0}$	0.20	0.28	0.002
Moyenne $moy_{p,0}$	8.07	7.08	0.424
$\delta_{p,0}$	0.02	0.04	0.005

TABLE 3.2 – Tableau récapitulatif de l’incertitude sur des paramètres d’ajustement, pour le carbopol *carb000* (19 mesures).

pour les deux matériaux, τ_c et k sont corrélés positivement. Toutefois, le rapport k/τ_c dépend de la préparation et reste constant pour les mesures avant ou après essai sur le canal.

Qualité de l’ajustement :

Pour le carbopol, l’ajustement des données rhéométriques par la loi de Herschel-Bulkley est systématiquement très satisfaisant, sur la totalité de la gamme de taux de cisaillement explorée (voir la figure 3.9). Pour le kaolin, en revanche, nous avons constaté que procéder à un ajustement en séparant les forts taux de cisaillement des petits taux de cisaillement, offrait une meilleure représentation des données (voir la figure 3.10). Toutefois, compte tenu des incertitudes sur les mesures (voir la partie 3.3.5) nous retiendrons l’ajustement sur la gamme de sollicitation $[10^{-2}; 10^2] \text{ s}^{-1}$ pour les expériences avec le kaolin, dans ce qui suit.

Incrtitude sur les paramètres rhéologiques

Cas du carbopol : Pour évaluer l’incertitude sur les paramètres d’ajustement de la loi de Herschel-Bulkley, nous avons conduit 19 déterminations indépendantes de la courbe d’écoulement d’un matériau donné, chaque essai comportant comme toujours deux répétitions. Pour prendre en compte l’influence d’éventuels artéfacts de mesure, ces expériences ont été réalisées avec deux tailles d’outil plan-plan (40 mm et de 60 mm), et deux tailles d’entrefer (1000 et 1500 μm).

Pour chacun des trois paramètres rhéologiques, on calcule l’écart type e_p et la moyenne moy_p (le paramètre p désigne τ_c , k ou n), sur la population de ces 19 essais de répétition⁶. On en déduit l’incertitude relative sur ces paramètres sur le tableau 3.2, selon :

$$\delta_{p,0} = e_{p,0}/moy_{p,0}. \quad (3.5)$$

6. Voir les essais de répétition r_2 pour le matériau *carb000* dans le tableau C.1

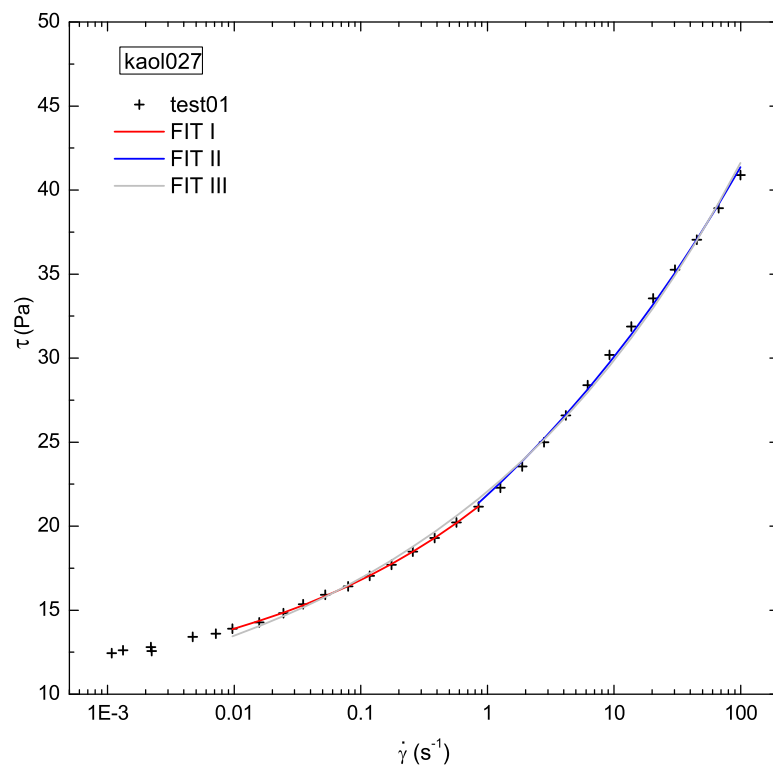


FIGURE 3.10 – Rhéogrammes pour un échantillon de kaolin. Les points de données indiquent les mesures. Les lignes continues représentent l'ajustement de ces mesures expérimentales selon une loi de Herschel-Bulkley. L'ajustement *FIT I* est appliqué sur la gamme des faibles taux de cisaillement $[10^{-2}; 1] s^{-1}$. L'ajustement *FIT II* est appliqué sur la gamme des forts taux de cisaillement $[1; 10^2] s^{-1}$. L'ajustement *FIT III* est appliqué sur la gamme de cisaillement $[10^{-2}; 10^2] s^{-1}$ retenue pour notre étude.

Ensuite, pour chaque préparation de carbopol, pour laquelle le nombre d'essais rhéométriques m est limité, l'incertitude sur les paramètres rhéologiques est calculée sur la base des valeurs obtenues pour le carbopol *carb000*, de la manière suivante :

$$\Delta\tau_c = 2 \cdot \delta_{\tau_c,0} \cdot \tau_{c,moy} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right), \quad (3.6)$$

$$\Delta k = 2 \cdot \delta_{k,0} \cdot k_{moy} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right), \quad (3.7)$$

$$\Delta n = 2 \cdot \delta_{n,0} \cdot n_{moy} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right), \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

où $\tau_{c,moy}$, k_{moy} et n_{moy} représentent les valeurs moyennes des paramètres obtenues sur la préparation concernée.

On remarque aussi que le rapport k/τ_c est quasiment constant (égal à 0.9 s^n) pour tous les essais réalisés sur le carbopol *carb000*, ce qui montre clairement l'existence de corrélation dans la détermination de ces deux paramètres.

Cas du kaolin : Pour le kaolin, nous avons adopté le même principe de détermination de l'incertitude sur les paramètres rhéologiques, en nous basant également sur les valeurs d'incertitudes relatives obtenues à partir du carbopol *carb000*. En effet, nous ne disposons pas d'une population d'essai comparable pour le kaolin.

3.3.5 Incertitude sur la courbe d'écoulement

Outre les incertitudes sur les paramètres d'ajustement de la loi de Herschel-Bulkley établies dans le paragraphe précédent, nous aurons aussi besoin dans la suite de cette étude de caractériser globalement l'incertitude sur les courbes d'écoulement obtenues (voir la partie 5). Or, du fait de l'existence de corrélations entre les paramètres de Herschel-Bulkley, l'enveloppe d'incertitude sur la courbe d'écoulement ne peut être déduite simplement à partir des incertitudes sur ces paramètres. Par conséquent, nous proposons ci-dessous une méthodologie permettant d'évaluer directement ces enveloppes d'incertitude pour les deux matériaux étudiés.

Cas du carbopol

En préambule, rappelons que comme le taux de cisaillement est une grandeur imposée dans nos essais rhéométriques, la seule incertitude affectant les courbes d'écoulement est celle observée sur la contrainte cisailante. Cette incertitude est déterminée sur la base des données obtenues pour le carbopol de référence *carb000*, déjà utilisé précédemment (voir la partie 3.3.4).

Établissement du modèle d'incertitude : La méthode de détermination de l'enveloppe d'incertitude sur la courbe d'écoulement consiste à déterminer, point par point, le niveau d'incertitude $\Delta\tau_i$ sur chaque mesure de contrainte cisailante τ_i .

Les deux courbes enveloppes délimitant le domaine d'incertitude sont alors définies par les couples $(\dot{\gamma}; \tau_{i,sup})$ pour la courbe supérieure et $(\dot{\gamma}; \tau_{i,inf})$ pour la courbe inférieure⁷, avec :

$$\tau_{i,sup} = \tau_{i,moy} + \Delta\tau_i, \quad (3.10)$$

$$\tau_{i,inf} = \tau_{i,moy} - \Delta\tau_i, \quad (3.11)$$

où $\tau_{i,moy}$ est la moyenne sur les mesures de contrainte cisailante pour chaque niveau de sollicitation i , des m essais de rhéométrie réalisés sur un matériau donné (le nombre d'essais m variant généralement de 2 à 4). On définit également pour chaque série d'essais, un *rhéogramme moyen* correspondant aux couples $(\dot{\gamma}; \tau_{i,moy})$.

Pour estimer les valeurs d'incertitude $\Delta\tau_i$, nous avons à nouveau utilisé les données du carbopol de référence *carb000* pour lequel nous disposons d'un grand nombre d'essais rhéométriques (voir la partie 3.3.4). Sur cette population d'essais, nous avons calculé l'écart type $e_{0,i}$ sur les mesures de contrainte cisailante τ_i pour chaque niveau de taux de cisaillement imposé. Il apparaît que cet écart type varie fortement en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}_i$, selon une loi qui est bien représentée par un modèle de Herschel-Bulkley (voir la figure 3.11) :

$$e_{0,i} = a_0 + b_0 \cdot \dot{\gamma}^{c_0}, \quad (3.12)$$

où a_0 , b_0 et c_0 sont des constantes qui résultent de cet ajustement ($a_0 = 0.209$ Pa, $b_0 = 0.253$ Pa.s ^{c_0} et $c_0 = 0.475$).

Le fait que l'écart type $e_{0,i}$ suive une loi de type Herschel-Bulkley en fonction du taux de cisaillement, suggère que cette quantité pourrait suivre une loi simple en fonction de la contrainte cisailante. Il apparaît toutefois que le rapport $e_{0,i}/\tau_i$ n'est pas constant. Néanmoins, pour rendre compte de cette dépendance avec la contrainte nous utiliserons, dans la suite, l'incertitude relative $\delta_{0,i}$ définie comme :

$$\delta_{0,i} = \frac{e_{0,i}}{\tau_{i,0,moy}}, \quad (3.13)$$

avec $\tau_{i,0,moy}$ la moyenne sur les mesures de contrainte cisailante pour chaque niveau de sollicitation i dans le cas du carbopol *carb000*.

La figure 3.12 montre la dépendance de l'incertitude relative $\delta_{0,i}$ avec le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. Nous avons choisi là-encore de représenter cette dépendance sous la forme d'une loi de type Herschel-Bulkley, qui ajuste bien les données :

$$\delta_{0,i} = a_\delta + b_\delta \cdot \dot{\gamma}^{c_\delta}, \quad (3.14)$$

$$(3.15)$$

7. En pratique, $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{moy}$, avec une très faible dispersion.

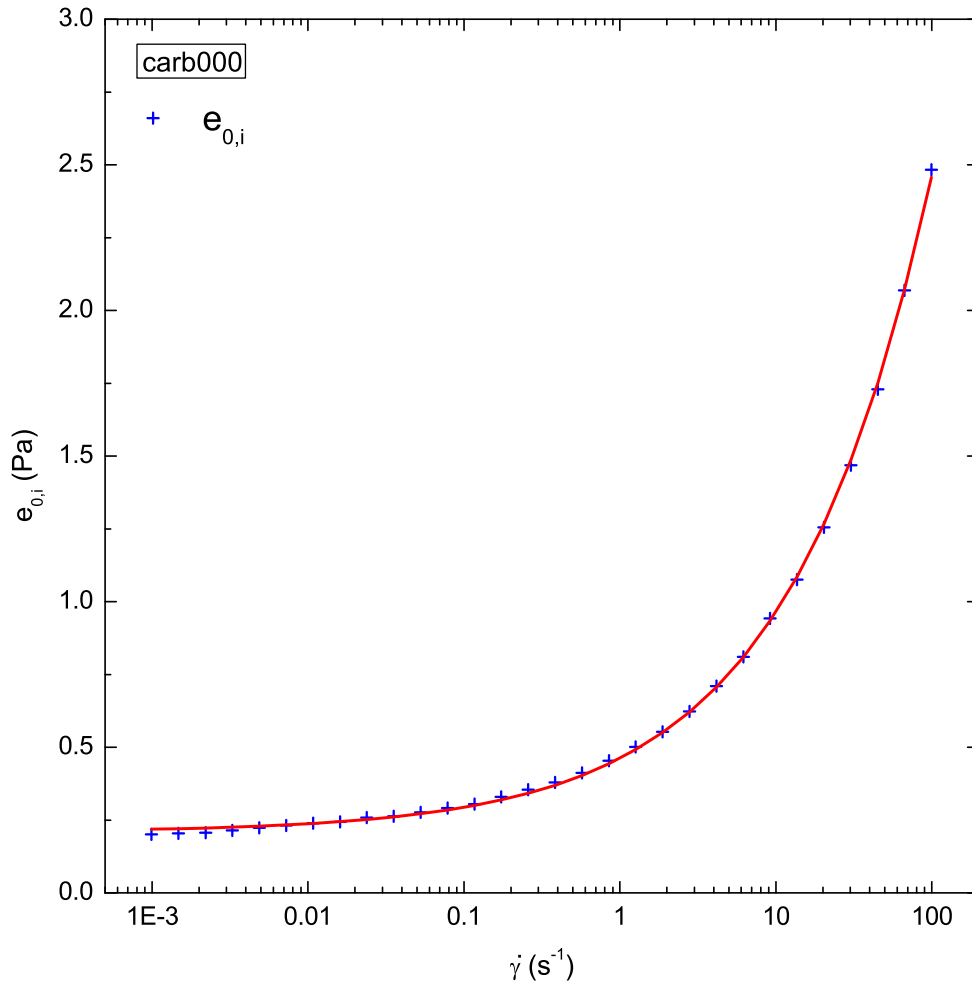


FIGURE 3.11 – Évolution de l'écart type absolu $e_{0,i}$ sur les mesures de contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour le carbopol *carb000*. La ligne continue représente un ajustement selon une loi de Herschel-Bulkley ($a_0 = 0.209$ Pa, $b_0 = 0.253$ Pa.s ^{c_0} et $c_0 = 0.475$).

avec $a_\delta = 0.02$ Pa, $b_\delta = 0.01$ Pa.s $^{c_\delta}$ et $c_\delta = 0.206$. Il est toutefois important de souligner ici que cet ajustement par une loi de Herschel-Bulkley a été choisi par pure commodité et qu'il ne revêt a priori aucune signification rhéologique.

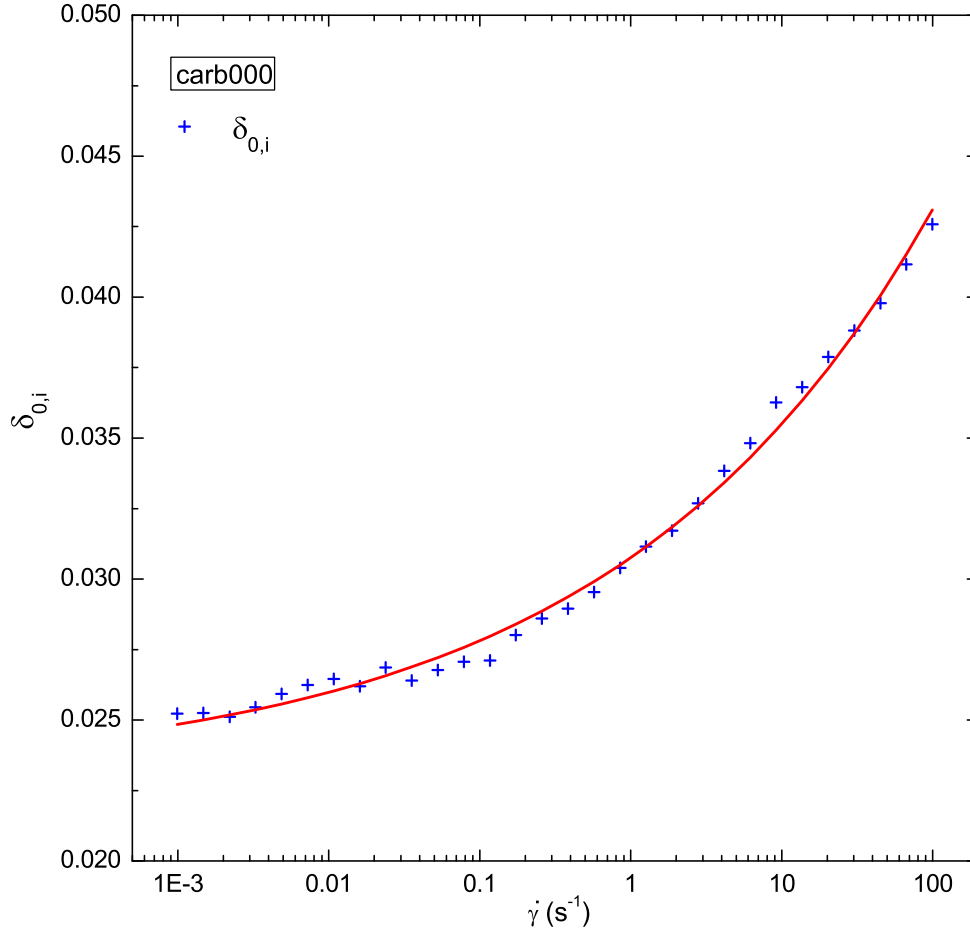


FIGURE 3.12 – Évolution de l'incertitude relative $\delta_{0,i}$ sur les mesures de contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour le carbopol *carb000*. La ligne continue représente un ajustement selon une loi de Herschel-Bulkley ($a_\delta = 0.02$ Pa, $b_\delta = 0.01$ Pa.s $^{c_\delta}$ et $c_\delta = 0.206$).

Le niveau d'incertitude $\Delta\tau_i$ sur les mesures de contrainte cisailante pour chaque population d'essais est alors définie à partir de l'incertitude sur *carb000* comme suit :

$$\Delta\tau_i = 2 \cdot \delta_{0,i} \cdot \tau_{i,moy} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{m}}\right), \quad (3.16)$$

où m représente le nombre d'essais dans la population considérée. Le facteur dépendant

de m dans cette équation permet de prendre en compte l'incertitude additionnelle liée à l'estimation des moyennes $\tau_{i,moy}$ lorsque le nombre d'essais est réduit. Les valeurs de $\delta_{0,i}$ prises en compte dans ce calcul sont celles obtenues à partir de l'ajustement 3.14, ce qui permet de l'appliquer aussi aux essais pour lesquels les niveaux de taux de cisaillement sont différents de ceux utilisés avec le carbopol *carb000* (interpolation).

Enfin, les enveloppes d'incertitude ainsi obtenues sont elles-mêmes ajustées par une loi de type Herschel-Bulkley :

$$\tau_{i,sup} = T_{sup} + K_{sup} \dot{\gamma}^{N_{sup}}, \quad (3.17)$$

$$\tau_{i,inf} = T_{inf} + K_{inf} \dot{\gamma}^{N_{inf}}, \quad (3.18)$$

Les paramètres d'ajustement T_{sup} , K_{sup} et N_{sup} pour la courbe supérieure, et T_{inf} , K_{inf} et N_{inf} pour la courbe inférieure, sont indiqués en annexe C et ce domaine d'incertitude est représenté sur les figures de l'annexe A pour chaque série d'essais.

De nouveau, il est important de mentionner ici que ni cet ajustement ni les paramètres associés ne doivent être interprétés en termes rhéologiques. Le choix d'une loi de type Herschel-Bulkley pour décrire les deux courbes enveloppes nous permettra de simplifier l'étude des incertitudes associées à la rhéologie lors de nos expériences en canal expérimental dans la partie 5.

Application du modèle d'incertitude : La figure 3.13 montre que le modèle d'incertitude établi ci-dessus permet effectivement de rendre compte de toutes les mesures obtenues sur le carbopol *carb000*. De même, nous avons vérifié que les courbes enveloppes calculées pour chaque préparation de carbopol permettent systématiquement d'encadrer les différentes courbes d'écoulement mesurées sur ces préparations (voir l'annexe A). Ceci valide ce modèle d'incertitude sur la courbe d'écoulement.

Cas du kaolin

Pour le kaolin, nous ne disposons pas de série d'essais équivalente à celle réalisée sur le carbopol *carb000*. C'est pourquoi, l'incertitude sur les courbes d'écoulement du kaolin est calculée comme pour le carbopol à partir de l'équation 3.16, sur la base des mesures effectuées sur *carb000*. Comme pour le carbopol, nous avons vérifié que les enveloppes d'incertitude ainsi obtenues permettent effectivement d'encadrer les courbes d'écoulement mesurées pour toutes les populations de kaolin testées (voir les figures en annexe B). Les paramètres d'ajustement correspondant à ces courbes-enveloppes ainsi qu'au rhéogramme moyen sont récapitulés en annexe D.

3.3.6 Autres caractéristiques rhéologiques des matériaux étudiés

Évolution des caractéristiques des matériaux : Les essais rhéométriques conduits sur les matériaux prélevés dans le réservoir de stockage et ceux prélevés au terme d'une expérience sur le canal mettent en évidence une diminution systématique des propriétés rhéologiques. Cette diminution est observée pour les deux matériaux (de 2 à 20% sur la contrainte seuil). Cette diminution des paramètres rhéologiques est vraisemblablement principalement due à la pollution du matériau lors des différentes manipulations et des expériences. Elle pourrait aussi

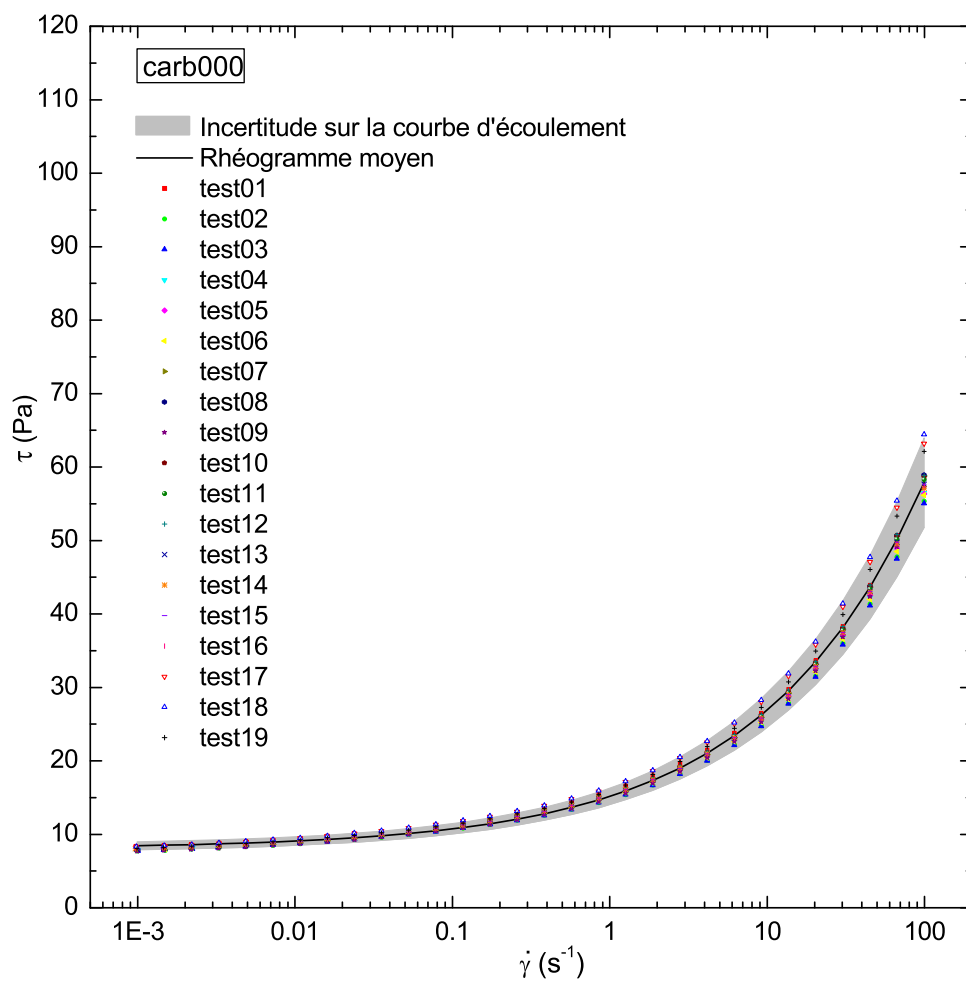


FIGURE 3.13 – Rhéogramme moyen (en trait plein) et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement pour le carbopol *carb000*. Les points représentent les 19 essais (les répétitions) effectués.

être due, en partie, au niveau de sollicitation que subit le matériau lors de l'écoulement dans le canal. Toutefois, ce dernier effet doit rester très limité comme le montrent les répétitions des essais rhéométriques effectués sur un même échantillon (voir 3.3.2) pour des niveaux de taux de cisaillement analogues à ceux subis dans le canal.

Les bulles d'air : La préparation des deux matériaux est réalisée de manière à limiter au maximum l'incorporation des bulles d'air dans ces fluides à seuil. Toutefois, on ne peut éviter complètement le piégeage de bulles à la fois lors de la préparation et lors des expériences. Dans le cas du carbopol, nous avons vérifié que la présence de ces bulles n'influe pas sur les propriétés rhéologiques mesurées. En effet, les paramètres de Herschel-Bulkley obtenus sur un échantillon utilisé dans le canal contenant des bulles ($\tau_c = 15.42$ Pa, $k = 7.88$ Pa.s^{*n*}, $n = 0.407$) et ceux obtenus sur le même échantillon après dégazage dans une cloche sous vide ($\tau_c = 15.47$ Pa, $k = 8.29$ Pa.s^{*n*}, $n = 0.400$) sont identiques compte tenu des niveaux d'incertitude.

Chapitre 4

Dispositif expérimental : canal incliné à fond mobile

4.1 Principe du dispositif

Un dispositif expérimental a été développé afin de générer des coulées gravitaires stationnaires dans le référentiel du laboratoire. Le but étant de les étudier sur des temps longs pour une large gamme de vitesse. Il s'agit d'un canal incliné dont le fond est constitué par un tapis roulant, circulant vers l'amont. En s'opposant à la vitesse naturelle de l'écoulement, le défilement du tapis permet d'obtenir une coulée globalement stationnaire. De plus, pour contrecarrer la tendance naturelle des coulées à s'étaler, la recirculation du fluide est forcée à l'amont en fermant le canal avec une paroi rigide (Figure 4.1). De tels dispositifs impliquant des fonds mobiles (tapis roulants) ont été mis en place avec succès dans le cadre d'études sur les écoulements gravitaires [38, 43].

Les vitesses locales de l'écoulement sont orientées vers l'amont du canal au contact du tapis et vers l'aval à la surface libre, de sorte que la vitesse moyennée sur la hauteur reste nulle. Nous considérons, étant donné le principe de fonctionnement du dispositif que les caractéristiques de la coulée et le profil de vitesse à l'intérieur de l'écoulement restent proches d'une coulée sans tapis roulant. Plus précisément, en comparant le profil de vitesse d'un écoulement sur le canal expérimental à celui d'un écoulement à surface libre permanent uniforme d'un fluide de Herschel-Bulkley, nous considérons que les profils sont identiques, à une translation de la vitesse moyenne près. De ce fait, le défilement du tapis vers l'amont ne ferait que ramener la vitesse moyenne de la coulée à zéro, et ainsi rétablir la stationnarité de la coulée .

4.2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place ainsi que tous ses éléments structuraux (Figure 4.3) reposent sur un bâti en profilé aluminium modulaire fixé au sol avec une armature immobile. Le corps du canal consiste en un châssis de convoyeur à bande industriel muni d'un tapis. Le châssis est harnaché à l'amont sur les deux côtés à un moufle, muni d'un système de poulie et de câbles permettant de soulever la structure afin de régler la pente du dispositif (jusqu'à 30°). À l'aval, un tambour d'entraînement (de 80 mm de diamètre) est fixé à une structure

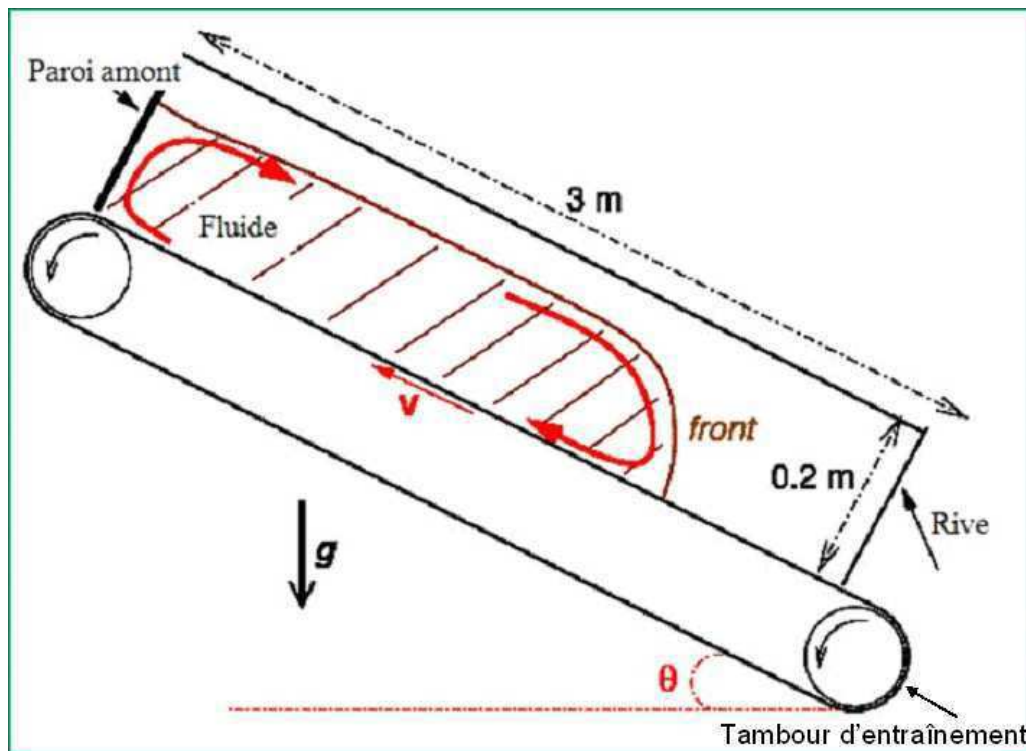


FIGURE 4.1 – Schéma de principe du dispositif expérimental : canal incliné à fond mobile.

multiaxiale reliée au sol par une rotule. Le tout permettant de stabiliser le dispositif et de s'adapter aux réglages fins de la pente et de la géométrie du canal. Le châssis comporte sur chacun de ses côtés deux disques latéraux qui reposent sur des plateaux horizontaux fixés sur le bâti principal. Ces quatre points sont indépendants de manière à pouvoir régler précisément l'angle de pente tout en conservant une horizontalité parfaite dans la direction transverse. La charge totale admissible sur le dispositif est de l'ordre de 70 kg. La planéité du fond est assurée par une sole en verre, parfaitement plane, d'une épaisseur de 8 mm, sur laquelle vient reposer le tapis du convoyeur.

Le tapis consiste en une bande fermée autour du châssis avec une soudure thermique suffisamment résistante aux efforts de traction que le tapis pourrait subir sur le dispositif. Il s'agit d'une bande transporteuse, destinée au transport alimentaire et donc chimiquement stable pour éviter toute altération du matériau d'essai. Son épaisseur de 2 mm est construite sur trois couches : un côté transport en PVC, avec un état de surface permettant une bonne adhésion des matériaux en écoulement, une couche intermédiaire de traction, et enfin d'un côté de contact en tissu de Polyester. Cette texture permet une circulation optimum du tapis : sans résistance au mouvement du tapis ni glissement de celui-ci sur la sole plane et les tambours amont et aval.

Le canal expérimental présente une section rectangulaire matérialisée par deux rives parallèles et une paroi amont. Cet ensemble est maintenu au dessus du tapis et au contact de ce dernier par l'intermédiaire d'un système de joints. Le canal a une longueur de 3 m et une

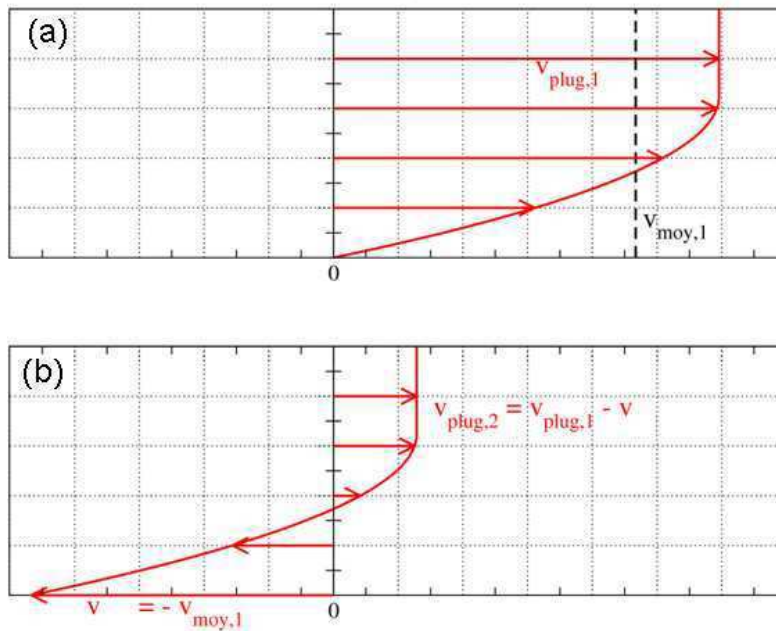


FIGURE 4.2 – Allure qualitative du profil des vitesse d'un fluide de Herschel-Bulkley en écoulement permanent et uniforme sur un plan incliné (a) sans tapis roulant (b) avec un tapis roulant qui défile vers l'amont du canal avec une vitesse $V = u_b$.

largeur ajustable dans une gamme de 0–0.6 m. Les rives sont en plexiglas transparent, d'une épaisseur de 10 mm et d'une largeur de 20 cm. La base de chacune des rives est munie d'un joint compressible en téflon de 2 mm. Ces deux rives sont rattachées au bâti avec des appuis qui permettent de s'adapter à l'inclinaison du canal et de régler finement la largeur du canal ainsi que la hauteur des rives par rapport au tapis mobile. Ce réglage est crucial car il permet d'assurer l'étanchéité et de réduire les frottements sur les surfaces de contact entre la base fixe des rives et la face du tapis en mouvement. Enfin, le canal est fermé à l'amont avec une trappe rigide en PVC, perpendiculaire au fond. La base de cette trappe est munie d'un joint en téflon similaire à celui des rives ainsi que d'un système d'étanchéité latéral au contact de la face intérieure des rives. Le contrôle de la géométrie du canal et de l'étanchéité par l'intermédiaire des réglages fins nous permet d'éviter les fuites de fluide. De plus, cela permet d'éviter les points de blocages ou de frottement à l'origine d'instationnarités hydrodynamiques.

4.3 Instrumentation du canal expérimental

4.3.1 Contrôle de la vitesse de défilement du tapis

Le défilement du tapis est assuré par un moteur électrique asynchrone. Le tambour d'entraînement du tapis est couplé au moteur par une courroie crantée. La vitesse de celui-ci est entièrement contrôlée par un variateur électronique permettant de faire varier la vitesse de défilement du tapis dans une gamme de 0–1.5 m.s⁻¹. Le système de pilotage du moteur devrait

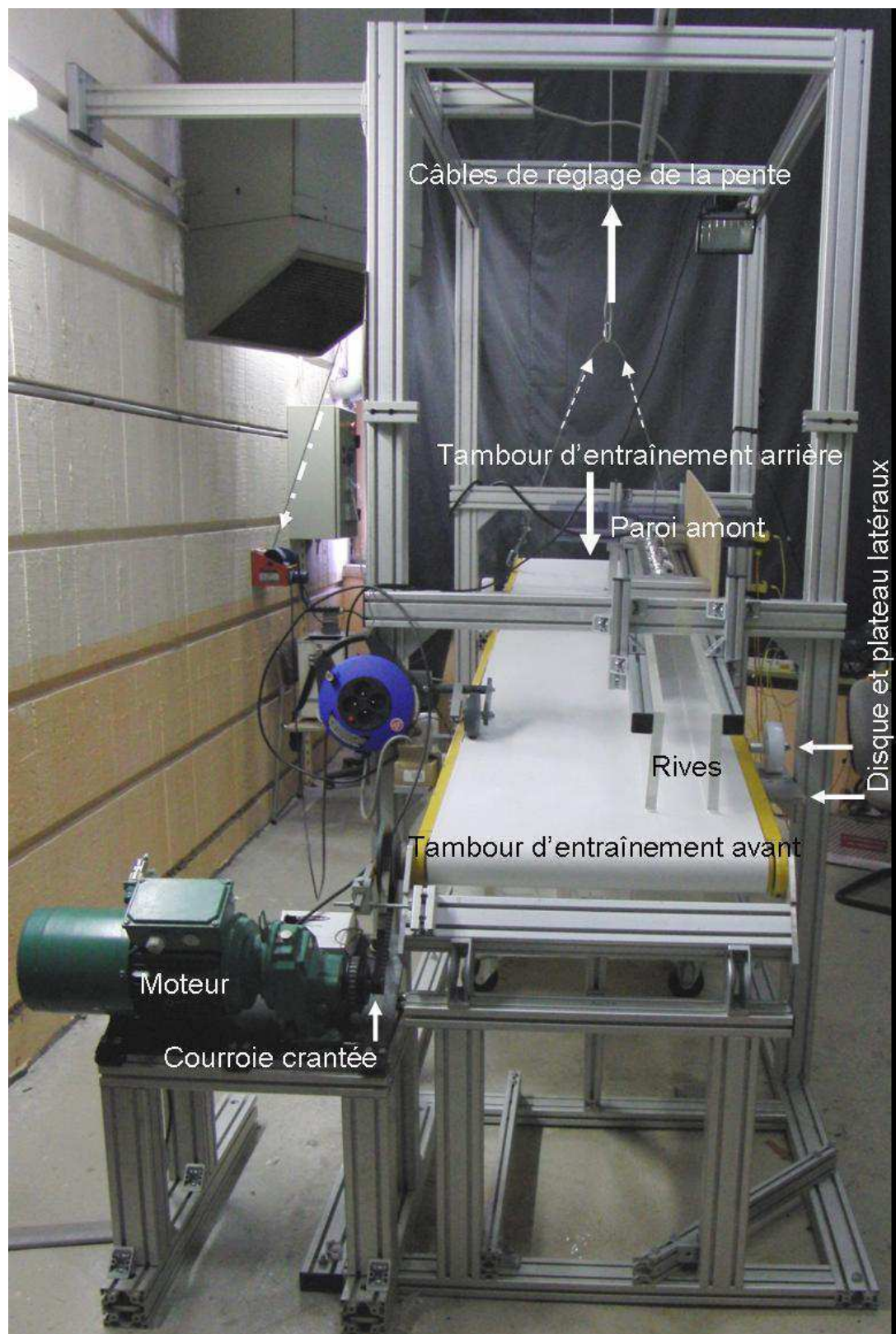


FIGURE 4.3 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental.

garantir la régularité de tout niveau de vitesse imposée dans cette gamme. Néanmoins d'éventuelles variations de charge peuvent conduire à des variations de vitesses. Ainsi, le contrôle de la vitesse de défilement du tapis nous a amené à développer un capteur de déplacement angulaire. Deux capteurs de ce type ont été placés sur le dispositif expérimental. L'un est fixé sur le tambour d'entraînement du tapis. Le second capteur est fixé sur un disque entraîné par le bord du tapis. La comparaison entre les mesures de ces deux capteurs permet de contrôler l'apparition d'un éventuel glissement du tapis sur son tambour d'entraînement.

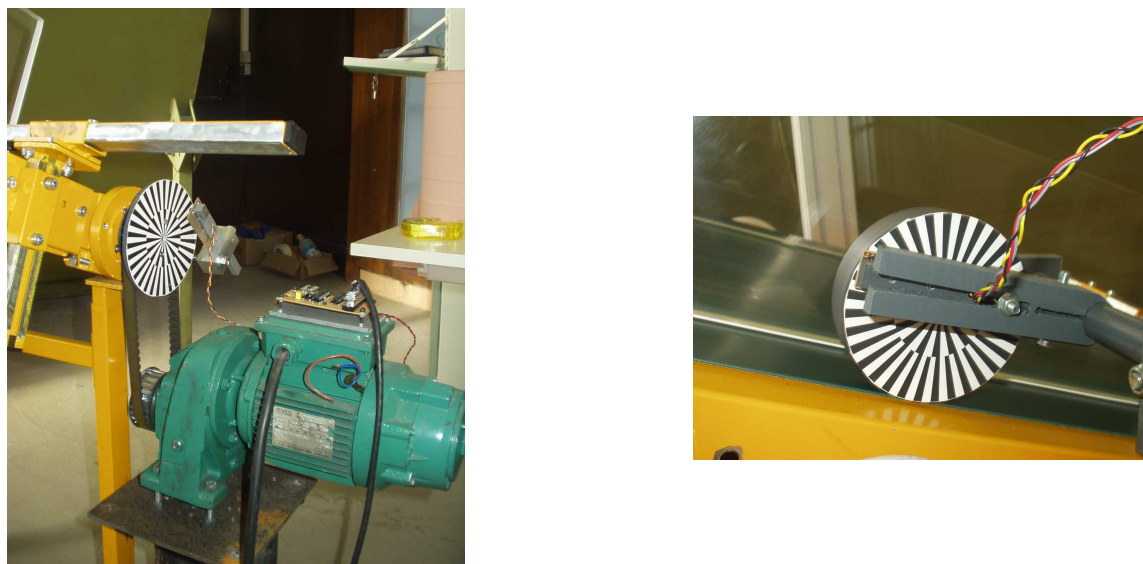


FIGURE 4.4 – À gauche, capteur de déplacement angulaire fixé sur le tambour d'entraînement du tapis. Le tambour est couplé au moteur par une courroie crantée. À droite, capteur de déplacement angulaire fixé sur un disque entraîné par le tapis.

Chaque capteur est constitué d'un disque comportant 64 secteurs angulaires alternativement noirs et blancs. Ce disque est solidaire de l'axe en rotation. Un couple photodiode-phototransistor fixe détecte le défilement des secteurs au cours du temps. Une électronique compte le nombre de changements de secteurs et transmet cette information de déplacement angulaire à un PC via le port parallèle. Un traitement de signal permet alors d'en déduire la vitesse angulaire et, par la suite, la vitesse linéaire du tapis au cours du temps. En fonction des paramètres utilisés pour la dérivation de la vitesse, on obtient une précision sur cette mesure de l'ordre de $\pm 3 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ pour un temps d'intégration d'une seconde.

4.3.2 Visualisation de la forme des coulées des fluides homogènes

La technique de visualisation de la forme de la coulée (méthode optique) a été utilisée pour les deux matériaux modèles. Mais ce mode opératoire n'a pas été concluant pour le kaolin car l'opacité du matériau a rendu difficile la détection de la surface au bord à cause des dépôts qui adhèrent à la rive.

Les formes des coulées ont été visualisées et enregistrées en plaçant une caméra (ou un appareil photo) face à l'une des rives transparentes du canal. Sur la face extérieure de la rive opposée, nous avons fixé un fond noir (ou blanc) uni qui permet d'obtenir un meilleur contraste sur l'écoulement. La caméra est ensuite disposée afin de visualiser une taille de champ d'acquisition, avec un éclairage adapté. La caméra est placée selon un axe perpendiculaire à la face de la rive, à l'aide d'une mire 3D (Figure 4.5) munie de deux disques concentriques. La base du disque extérieur est appuyée sur la face extérieure de la rive, et repose sur le fond du canal. Le principe étant de faire disparaître visuellement au centre de l'image, le cercle du disque intérieur, situé au sommet de la mire. La planéité de la prise de vue est réglée en inclinant la caméra de sorte que les lignes horizontales et verticales, dans le champ d'acquisition, soient bien parallèles aux lignes de la grille de référence (Figure 4.5) placée au centre. Celle-ci repose sur le fond du canal, contre la face intérieure de la rive. La mise au point et la netteté des images ont été définies sur la face de cette grille. Les graduations de la grille permettant d'établir l'échelle de mesure (rapport millimètre par pixel).

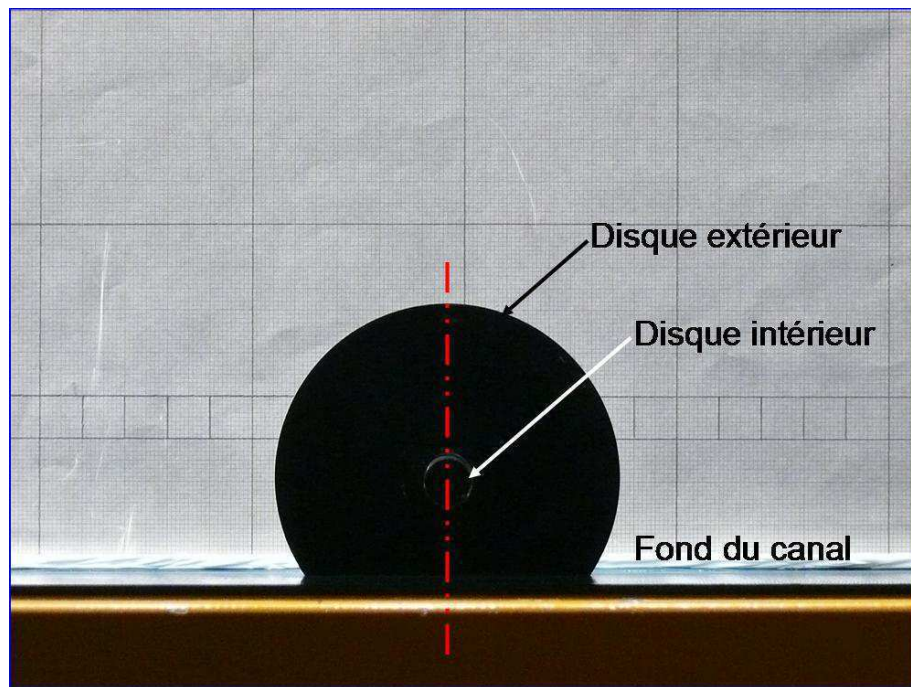


FIGURE 4.5 – Mire 3D composée de deux disques concentriques disposée sur le fond du tapis dans le champ d'acquisition délimité par une grille graduée en arrière plan : une prise de vue de la grille seule sur le plan intérieur de la rive permet de déterminer l'échelle.

La méthodologie consiste à enregistrer des séquences d'images brutes (Figure 4.6-a) de la coulée qui sont ensuite traitées afin d'extraire la forme de la coulée. Les images brutes sont converties en niveau de gris (8 *bit*) dans le quel chaque pixel est associé à une valeur allant de 0 pour le blanc à 255 pour le noir (Figure 4.6-b). Dans le cas d'une prise de vue globale de la coulée, on sépare l'image initiale en deux parties, zone du front et zone de hauteur normale, pour y appliquer des traitements séparés. Ensuite, des opérations morphologiques de traitement d'image (homogénéisation par filtre morphologique, détection de contour par filtre

de Canny et seuillage à hystérésis, élimination des petits objets,...) sont appliquées afin de détecter la position de la ligne de contraste correspondant à la surface libre pour chacune des images. Les traitements d'images doivent être adaptés au cas par cas, du fait des nombreuses singularités apparaissant dans l'écoulement tels que : les reflets, les ombres, les petits objets et les bulles d'air dans le fluide. Par ailleurs, on peut estimer de façon globale l'épaisseur de la coulée en superposant, tout simplement, l'image brute (ou en niveau de gris) à la grille de référence à l'échelle réelle (Figure 4.6-c).



FIGURE 4.6 – (a) image brute dans la zone hauteur normale (b) image en niveau de gris à traiter (c) image brute sur grille de référence

La précision de cette technique de visualisation est tributaire du coefficient de conversion (pixel-mm), de l'erreur sur la position des repères géométriques sur le canal et du traitement d'image :

- Le coefficient de conversion est calculé en échantillonnant différents segments de longueur connue, dans le champ d'acquisition. Chaque segment correspond à un côté, de 10 mm, d'un carré élémentaire sur une grille millimétrique. L'erreur sur ce coefficient dépend de la précision de mesure et de la moyenne sur la taille des segments. Cette moyenne est liée principalement à la taille du pixel sur l'image et à la technique de détection des points sur les segments. Aussi, nous avons veillé à ce que la grille soit bien parallèle à la face de la caméra en superposant une ligne de la grille, sur la totalité de la longueur du champ de l'image, et une ligne fictive parallèle à un grand bord de l'image. Ce qui permet de minimiser l'angle de déviation et d'assurer la planéité de l'image par rapport aux repères géométriques de la caméra.
- La précision de cette technique dépend aussi de l'erreur de repérage d'une ligne de référence et d'une seconde ligne au fond du canal. Pour la première, il s'agit de l'erreur sur la détection de la ligne tracée distinctement dans le champ d'acquisition, parallèlement à un bord long de l'image, à une position connue sur la grille. Cette ligne nous sert de repère géométrique pour déterminer la position verticale de la surface libre. Pour la seconde, l'erreur provient de l'amplitude verticale de déformation du tapis sous le poids du support de la grille de référence. En effet, la grille de référence repose contre la face intérieure d'une rive du canal et repose sur le fond du canal.
- Enfin, la précision sur les mesures avec cette technique dépend aussi de la détermination de la position de la surface libre. La détermination de cette position dépend des opérations morphologiques et algorithmes de calcul nécessaires à la détermination des contours.

Dans ces conditions, nous avons estimé systématiquement l'erreur de mesure pour chacun

des essais et pour chaque image. En définitive, la précision sur la position en hauteur de la surface libre est de l'ordre de ± 1 mm avec un coefficient de conversion de l'ordre de $\frac{1}{10}$ mm par pixel.

4.3.3 Les capteurs de hauteur ponctuelle

Le dispositif est équipé de capteurs de hauteur ponctuelle à ultrasons et à optique laser. Le principe des capteurs à ultrasons consiste à mesurer le temps de vol d'une onde ultrasonique réfléchi par la surface libre de la coulée. La valeur de cette mesure de hauteur correspond à une moyenne spatiale sur une projection circulaire de 10 mm de diamètre. Le principe du capteur laser consiste à émettre un faisceau laser sur la surface de la coulée qui se réfléchit selon une méthode de triangulation optique qui permet de déterminer la distance parcourue entre le point d'émission et la surface libre. Les deux technologies de capteurs délivrent à une même carte d'acquisition des informations sous forme de signaux de tension, en fonction du temps, dans une gamme allant de -10 V à $+10$ V pour les capteurs ultrasons et de -5 V à $+5$ V pour le capteur à technologie laser. Le signal délivré n'est pas strictement constant mais oscille autour d'une valeur moyenne, avec une amplitude maximale de l'ordre de 5 mV.

Les capteurs sont placés sur des fixations rigides indépendantes des autres réglages, au dessus de la coulée, perpendiculairement au fond du canal (Figure 4.7-a). Lorsque plusieurs capteurs sont alignés, ils sont placés à des distances suffisamment grandes les uns des autres (plus de 10 cm) afin d'éviter les interactions entre les champs de mesures de chacun des capteurs. La position verticale des capteurs (à hauteur des rives, c'est-à-dire à 20 cm du fond du canal) a été choisie pour permettre la manipulation et les réglages sur les capteurs tout en évitant d'endommager les cellules de détection des capteurs au contact direct avec le fluide.

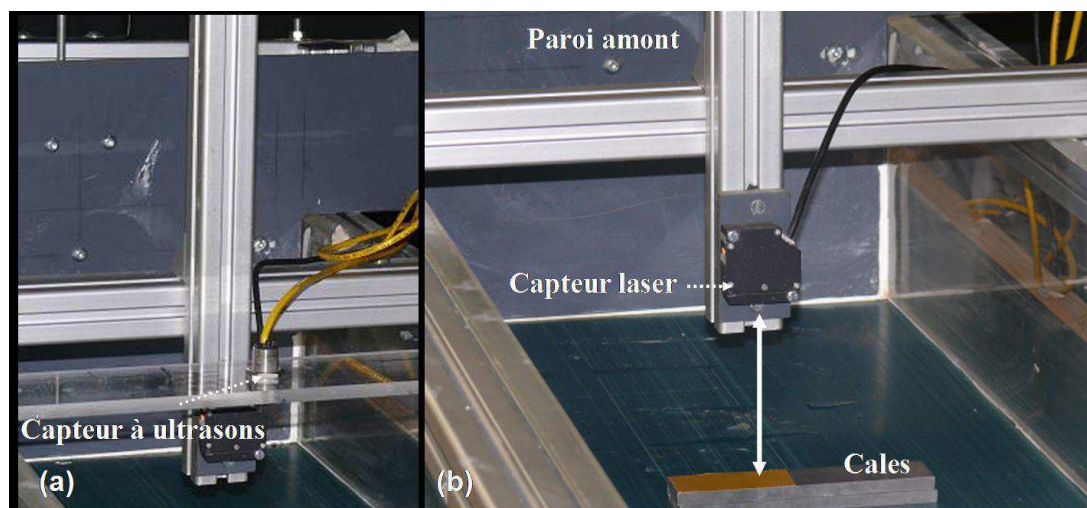


FIGURE 4.7 – (a) Capteur à ultrasons et capteur laser fixés à mi-largeur du canal à la hauteur des rives (20 cm) perpendiculairement au tapis (b) Deux cales de calibration en acier placées au droit d'un capteur laser : la cale supérieure est recouverte d'un adhésif sur la surface de réflexion de la ligne laser du capteur

La calibration des capteurs intervient après fixation définitive des capteurs et finalisation des réglages sur le canal. Seul le réglage fin sur l'étanchéité des rives se poursuit lors de l'essai car il est indépendant des capteurs. Le pas de calibration correspond à l'épaisseur d'un objet rigide de surface plane et régulière, de hauteur mesurée avec une précision inférieure à 0.01 mm. Les paliers de calibration correspondent à la hauteur cumulée de cales planes en acier (de 7.96 mm de hauteur) disposées au droit du capteur (Figure 4.8). Notons que pour la calibration du capteur laser, nous avons recouvert une cale avec un adhésif (Figure 4.7-b). Cette cale est disposée au sommet de tout palier pour éviter les défauts de réflexion du laser sur la surface en acier (prendre en considération la hauteur de l'adhésif : la hauteur devient 8.11 mm). Les capteurs sont calibrés deux fois, une première calibration est réalisée juste avant l'essai (avec 5 à 7 cales) puis une seconde est conduite systématiquement après le même essai (avec 2 à 4 cales), afin de contrôler la stabilité des repères géométriques.

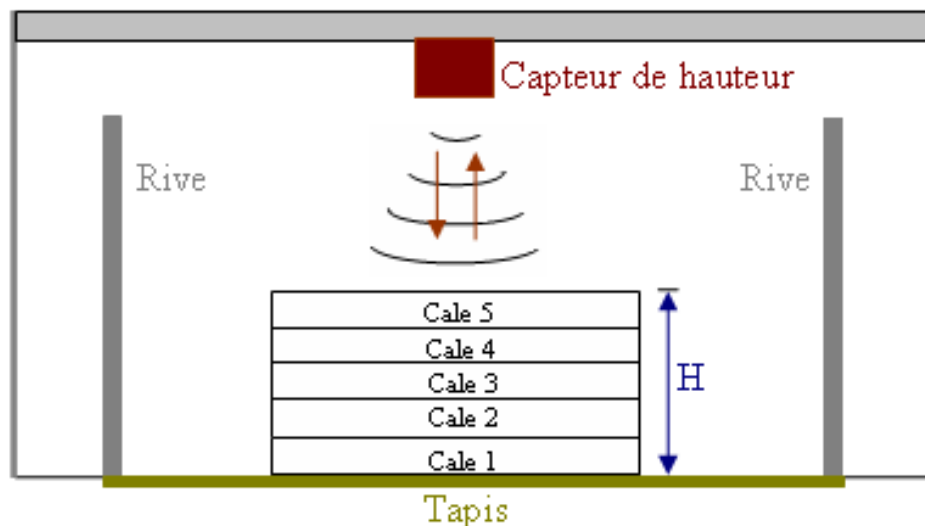


FIGURE 4.8 – Empilement des cales de calibration au droit d'un capteur de hauteur ponctuelle

La figure 4.9 illustre l'enregistrement d'un signal de tension en fonction du temps, pour la calibration d'un capteur à ultrasons (nommé H_2 , en référence à la sortie sur la boîte d'acquisition qui l'accueille). Sur cette figure on retrouve la réponse du signal à un empilement successif de 6 cales avec des durées d'enregistrement pour chaque palier de d'environ 30 secondes. Les pics correspondent au moment où l'on retire une cale à chaque palier d'enregistrement. La réponse du signal avant essai (avec 6 cales) et après essai (avec 2 cales) montre bien que le

capteur a subi un léger déplacement au cours de l'essai que l'on peut quantifier et de ce fait intégrer dans l'estimation des erreurs de mesure sur cette technique.

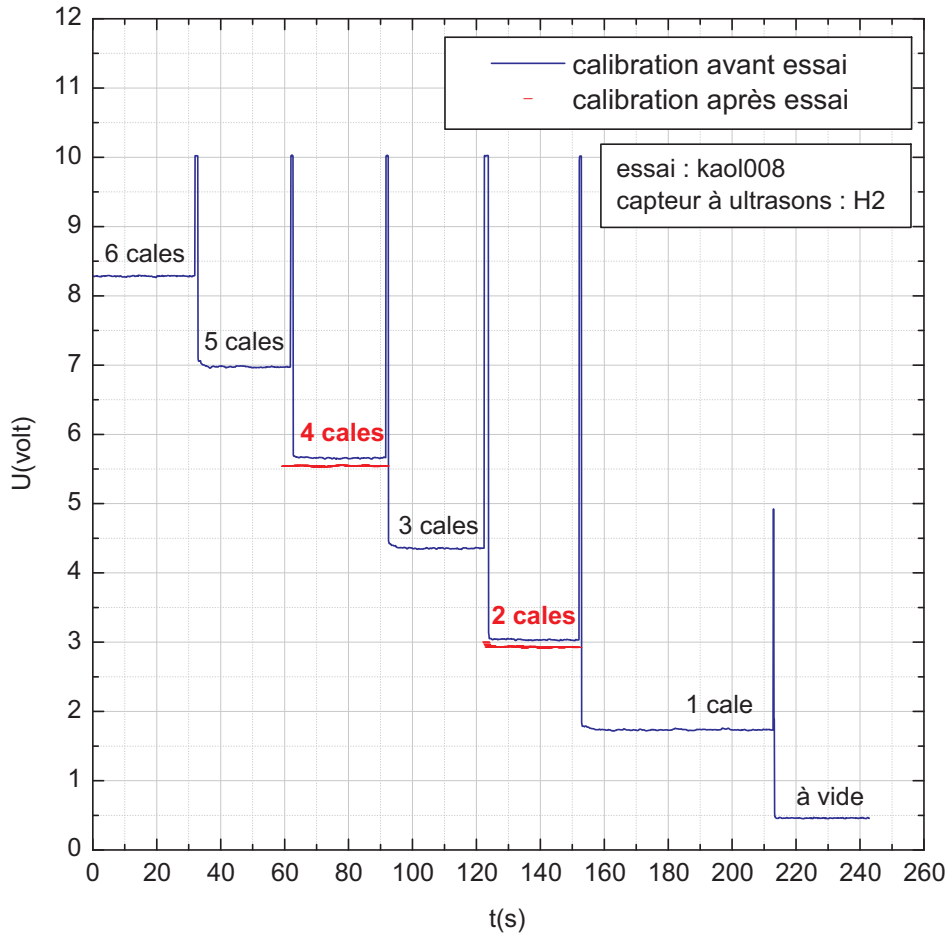


FIGURE 4.9 – Tension enregistrée en fonction du temps pour chaque hauteur cumulée par palier : calibration avant essai avec 6 cales puis calibration après essai avec uniquement 2 cales.

Sur chacun de ces paliers de calibration on échantillonne un signal moyen de tension U sur une durée d'environ 5 s. Par la suite, chaque mesure moyenne de tension est tracée en fonction de la hauteur cumulée des cales H correspondante. La fonction de calibration ainsi obtenue est linéaire pour toutes les mesures relevées sur nos essais (pour les deux technologies) : $U = aH + b$, où a et b sont des constantes qui dépendent de l'ajustement de la fonction linéaire (Figure 4.10). Ainsi définie, la fonction de calibration est utilisée pour convertir les mesures brutes de tension en hauteur d'écoulement.

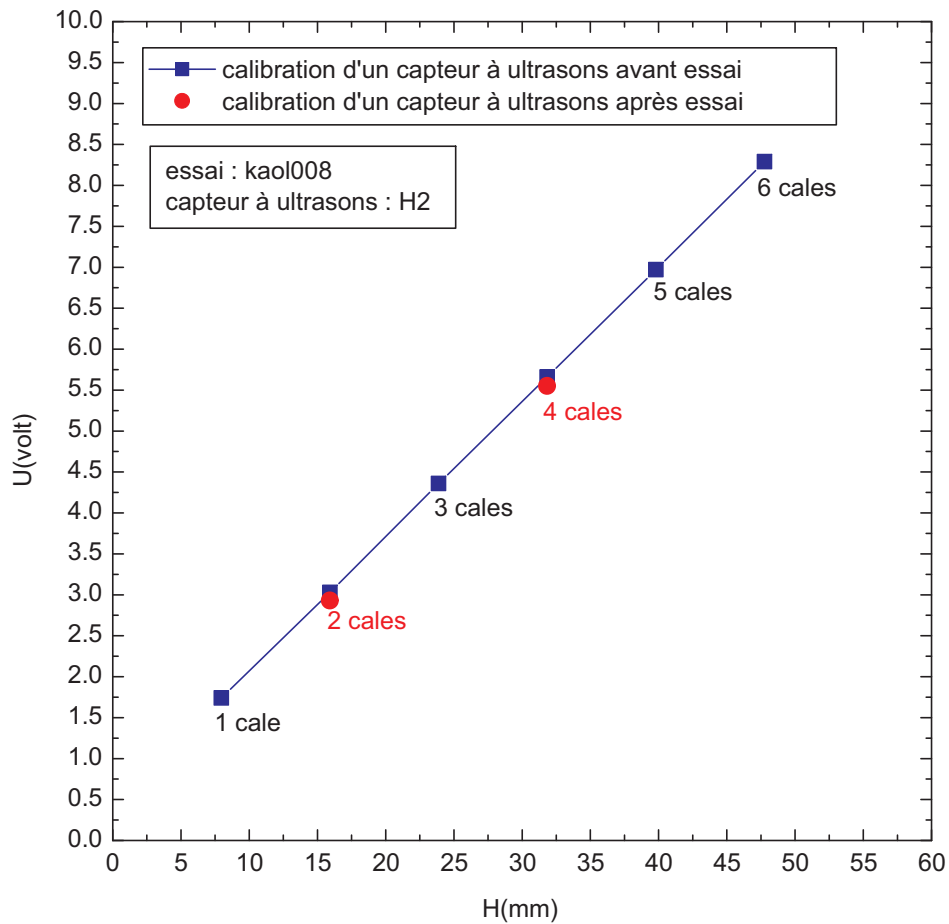


FIGURE 4.10 – Détermination de la fonction de calibration d'un capteur à ultrasons : la tension enregistrée en fonction de la hauteur cumulée pour une calibration avant essai avec 6 cales puis avec 2 cales après l'essai. Chaque point correspond à la moyenne du signal de tension sur 5 s, échantillonné sur chacun des paliers de calibration de la figure 4.9.

Après la calibration des capteurs, nous pouvons mettre en place un essai type en générant des coulées stationnaires pour une large gamme de vitesses pour des temps suffisamment longs permettant l'observation des coulées. Les mesures de hauteurs ponctuelles sont effectuées dans des zones où la hauteur de la coulée est constante (dans l'espace et le temps). Pour une pente donnée et une vitesse constante de défilement du tapis, le signal émis par les capteurs est réfléchi par la surface libre de la coulée puis enregistré par la centrale d'acquisition sur une durée optimale. Cette durée d'enregistrement pour chaque vitesse est de l'ordre de 30 secondes à 1 minute, permettant ainsi de collecter suffisamment d'informations pour être en mesure de calculer la moyenne du signal de tension tout en restant à volume constant de fluide sur le

canal (fuites).

La figures 4.11 et 4.12 représentent les mesures de hauteur d'écoulement obtenues avec des capteurs à ultrasons mis en œuvre dans des essais pour une pente et une vitesse données. Les valeurs de hauteur exploitées pour nos modèles représentent la moyenne des hauteurs sur toute la durée d'enregistrement. Ainsi, nous avons une valeur unique de hauteur par niveau de vitesse mis en oeuvre lors d'un essai.

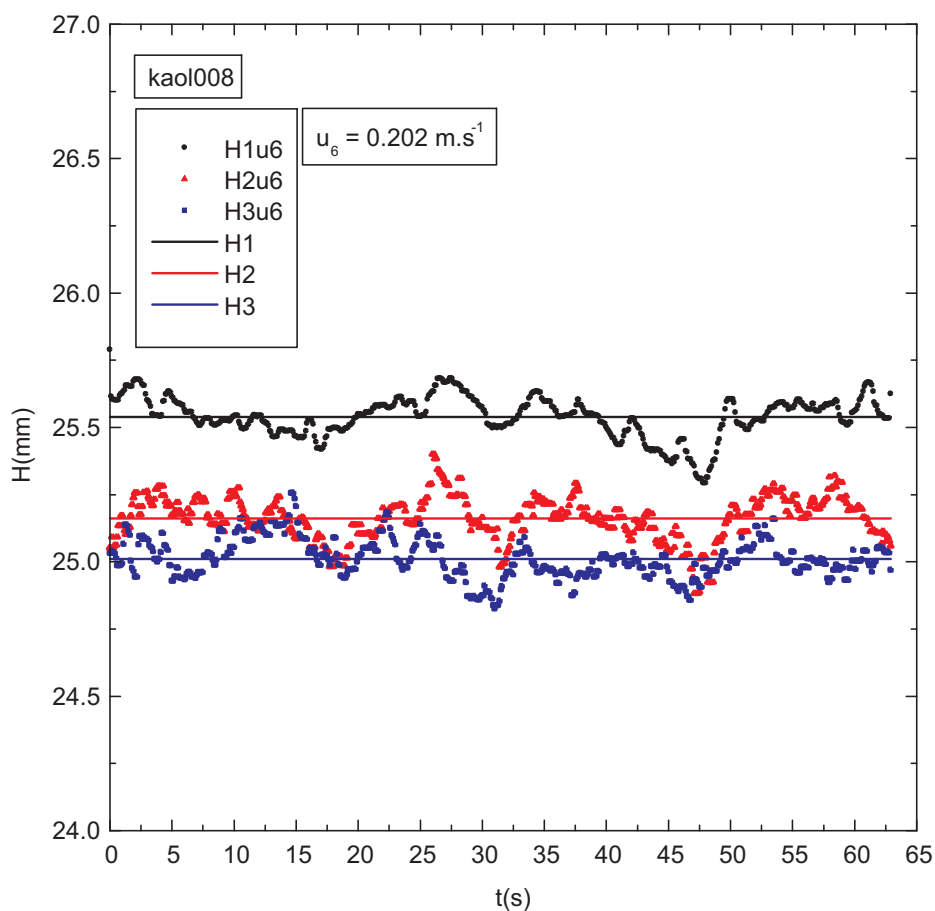


FIGURE 4.11 – Points de données (cas du kaolin) : enregistrement de hauteur d'écoulement en fonction du temps. Trait plein : moyenne sur la série de données.

Les erreurs de mesure de hauteur proviennent essentiellement du protocole de calibration (échantillonnage et moyenne sur le signal, mesure et disposition des cales, déplacement des capteurs) et du protocole de lissage des mesures de hauteur sur la surface libre de l'écoulement. En pratique, l'erreur sur la mesure peut s'écrire : $e = e_1 + e_2 + e_3$: e_1 est l'écart type sur

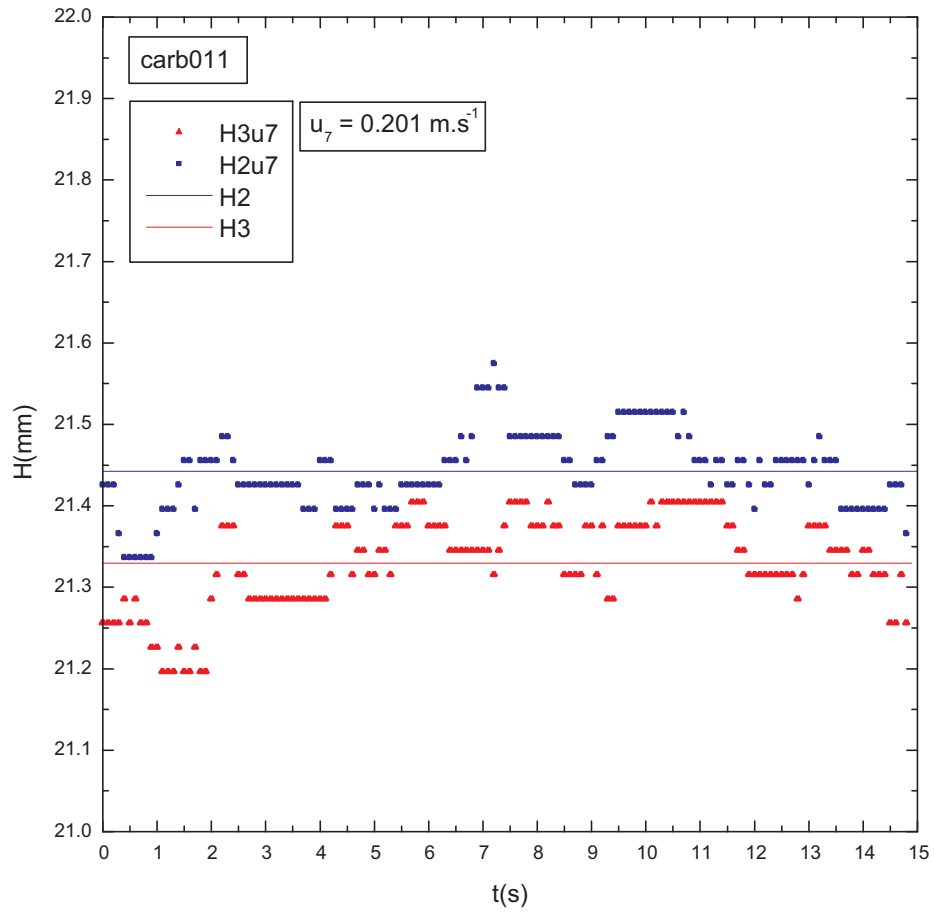


FIGURE 4.12 – Points de données (cas du carbopol) : enregistrement de hauteur d'écoulement en fonction du temps. Trait plein : moyenne sur la série de données.

une série de donnée de hauteur en fonction du temps (le temps est de 30 s à une minute), e_2 est le déplacement du capteur détecté avec la différence de mesure de hauteur entre la calibration avant l'essai et celle après l'essai, e_3 est l'erreur sur les valeurs d'ajustement de la loi de calibration. Parfois, on peut ajouter un facteur (bien que très faible) de correction de l'inclinaison de l'image. Le bilan de ces facteurs d'erreurs, pour chacun des essais mis en œuvre (pour le carbopol et le kaolin) induit une demi barre d'erreur sur les mesures de hauteur de l'ordre de ± 0.7 mm.

Chapitre 5

Résultats sur les fluides homogènes

5.1 Caractéristiques générales des écoulements

5.1.1 Description du protocole expérimental

Nous avons mené nos expériences sur le canal expérimental décrit dans le chapitre 4 avec les deux matériaux modèles présentés dans le chapitre 3. Les tableaux 5.1 et 5.2 récapitulent les caractéristiques et les paramètres des essais menés avec ces deux fluides à seuil. Chaque ligne du tableau correspond à un essai réalisé avec un matériau donné, pour une pente θ et une largeur fixée. Durant chaque essai, la vitesse de défilement du tapis est variée par paliers, généralement croissants. Pour chaque vitesse, le volume de la coulée est ajusté de manière à maintenir une longueur constante de l'ordre de 1 m.

Pour chaque essai, les paramètres rhéologiques des matériaux employés et les incertitudes associées sont déterminés indépendamment au rhéomètre selon le protocole décrit dans le chapitre 3. Les valeurs des paramètres rhéologiques indiquées dans les tableaux 5.1 et 5.2 correspondent toujours aux rhéogrammes moyens. En général, ces paramètres correspondent à des échantillons prélevés à la fin des essais sur le canal. Toutefois, dans certains cas, pour le carbopol, nous avons aussi mesuré les paramètres d'échantillons prélevés avant essai afin d'estimer l'évolution des propriétés rhéologiques durant les essais. Dans ce cas, les deux jeux de paramètres sont indiqués dans le tableau 5.1. Enfin, nous avons également indiqué la masse volumique ρ des échantillons de kaolin et de carbopol utilisés.

Dans les tableaux 5.1 et 5.2, nous indiquons également les techniques de mesure de hauteur d'écoulement utilisées pour les différents essais. Dans la suite, nous noterons H_1 les mesures obtenues par le capteur laser, et H_2 et H_3 les mesures obtenues par les deux capteurs à ultrasons (voir le chapitre 4). Ces trois capteurs sont généralement disposés au centre de la coulée (voir la figure 5.1) et à l'aplomb de la zone où la hauteur d'écoulement est constante (voir la partie 5.1.2). La distance entre les capteurs (15 à 20 cm) a été choisie de manière à ce qu'ils n'interfèrent pas entre eux. Enfin, nous notons H_{opt} les mesures de hauteur obtenues, toujours dans la zone d'épaisseur constante, par analyse d'images.

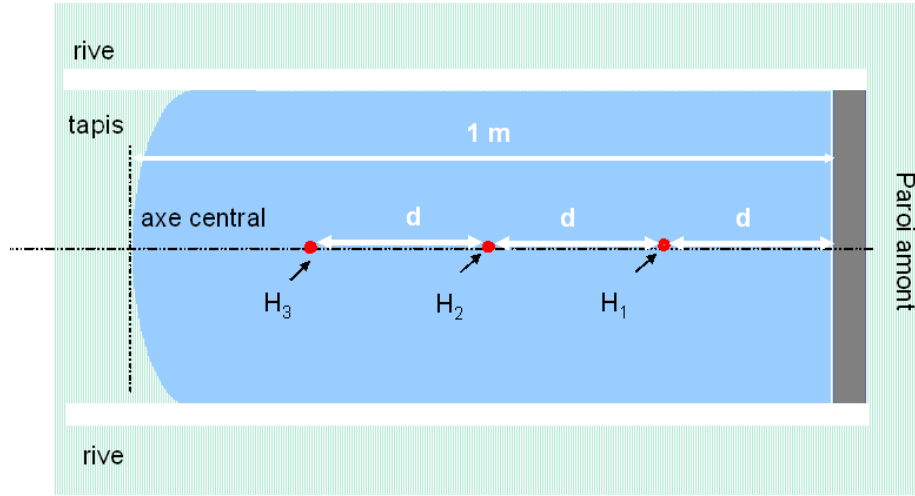


FIGURE 5.1 – Représentation schématique de la disposition des capteurs au dessus de l'écoulement. Le capteur H_1 est à technologie laser, les capteurs H_2 et H_3 sont de technologie à ultrasons. La distance d entre les capteurs varie selon l'essai de 15 cm à 20 cm.

carbopol	$\rho(\text{kg.m}^{-3})$	$\tau_c(\text{Pa})$	$k(\text{Pa.s}^n)$	n	$l(\text{m})$	θ°	$u_b(\text{m.s}^{-1})$	H	$H_N(\text{mm})$
carb001a ap	1000	18.43	9.89	0.390	0.4	22.2	0.312-0.691	H_{opt}	21.9-25.9
carb002b ap	1000	8.11	6.08	0.422	0.4	22.2	0.126-0.377	H_{opt}	11.9-16.7
carb003a av	1000	23.15	12.57	0.387	0.4	22.2	0.106-1.296	H_{opt}	19.9-30.4
carb003a ap	1000	18.25	10.32	0.385	0.4	22.2	0.106-1.296	H_{opt}	19.9-30.4
carb006a av	1000	22.24	11.56	0.387	0.4	11.8	0.104-0.833	H_{opt}	32.0-50.6
carb006a ap	1000	20.25	11.02	0.384	0.4	11.8	0.104-0.833	H_{opt}	32.0-50.6
carb007 ap	1000	20.82	11.40	0.393	0.4	11.8	0.133-1.019	H_{opt}	36.6-52.1
carb008a av	1000	20.82	11.40	0.393	0.4	11.8	0.103-1.019	$H_{opt,2}$	28.4-48.5
carb008a ap	1000	18.36	8.52	0.412	0.4	11.8	0.103-1.019	$H_{opt,2}$	28.4-48.5
carb009a ap	1000	14.62	9.72	0.374	0.4	6.7	0.061-1.015	H_{opt}	39.5-62.6
carb010b av	1000	15.44	10.28	0.381	0.4	12	0.067-1.257	$H_{opt,2,3}$	27.8-49.1
carb010b ap	1000	14.35	9.53	0.386	0.4	12	0.067-1.257	$H_{opt,2,3}$	27.8-49.1
carb011 ap	1000	7.05	6.26	0.396	0.4	12	0.056-0.357	$H_{2,3}$	15.3-25.9

TABLE 5.1 – Tableau récapitulatif des paramètres des essais conduits avec du carbopol : ρ est la densité du fluide, τ_c , k et n les paramètres d'ajustement du *rhéogramme moyen*, l la largeur du canal, θ la pente du canal, H désigne la technique de mesure de la hauteur, u_b la vitesse de défilement du tapis et H_N la hauteur de l'écoulement dans la zone uniforme. La mention *av* et *ap* indique si le matériau a été échantillonné avant ou après *le même essai* sur le canal.

kaolin ap	$\rho_{(\text{kg.m}^{-3})}$	$\tau_c(\text{Pa})$	$k(\text{Pa.s}^n)$	n	$l_{(\text{m})}$	θ°	$u_b(\text{m.s}^{-1})$	H	$H_N(\text{mm})$
Kaol001	1390	11.97	15.90	0.199	0.4	12	0.060-0.520	$H_{2,3}$	12.8-16.7
Kaol002	1435	14.39	17.41	0.198	0.4	7.2	0.043-0.888	$H_{1,2,3}$	24.0-35.9
Kaol003	1434	16.46	20.45	0.196	0.4	7.2	0.025-0.655	$H_{1,2,3}$	29.6-42.1
Kaol004	1430	9.53	16.95	0.186	0.4	14.8	0.027-0.621	$H_{1,2,3}$	12.6-18.8
Kaol005	1429	11.95	20.32	0.182	0.4	19.8	0.027-0.228	$H_{1,2,3}$	9.4-13.5
Kaol007	1426	14.96	19.76	0.194	0.4	19.8	0.025-0.509	$H_{1,2,3}$	11.2-17.1
Kaol008	1448	23.16	30.40	0.190	0.4	14.9	0.060-0.503	$H_{1,2,3}$	22.1-29.1
Kaol009	1363	3.05	11.26	0.185	0.4	14.9	0.026-0.459	$H_{1,2,3}$	7.5-12.2
Kaol010	1399	8.24	15.84	0.190	0.4	14.9	0.038-0.450	$H_{1,2,3}$	12.1-16.6
Kaol011	1429	11.39	17.85	0.198	0.4	14.9	0.051-0.351	$H_{1,2,3}$	14.1-18.4
Kaol012	1414	14.70	20.43	0.190	0.2	14.9	0.048-0.354	$H_{1,2,3}$	13.8-18.7
Kaol013	1414	13.34	21.92	0.172	0.1	14.9	0.057-0.356	$H_{1,2,3}$	14.6-20.4
Kaol019	1377	7.24	14.57	0.184	0.4	10.3	0.053-0.0.4	$H_{1,2,3}$	15.3-20.5
Kaol021	1383	6.37	15.02	0.179	0.4	6.8	0.050-0.0.4	$H_{1,2,3}$	22.3-29.3
Kaol022	1423	8.76	19.25	0.170	0.4	6.8	0.050-0.402	$H_{1,2,3}$	22.4-29.9
Kaol023	1408	7.45	17.03	0.175	0.4	14.8	0.050-0.398	$H_{1,2,3}$	11.3-15.3
Kaol024	1404	6.47	16.92	0.171	0.4	14.8	0.051-0.402	$H_{1,2,3}$	11.2-15.5
Kaol025	1376	3.68	17.23	0.161	0.4	14.8	0.035-0.252	$H_{1,2,3}$	10.6-13.4
Kaol026	1376	4.26	15.99	0.167	0.4	14.8	0.051-0.250	$H_{1,2,3}$	11.2-14.0
Kaol027	1411	5.73	16.51	0.170	0.4	14.8	0.050-0.401	$H_{1,2,3}$	11.3-14.9

TABLE 5.2 – Tableau récapitulatif des paramètres des essais conduits avec du kaolin : ρ est la densité du fluide, τ_c , k et n les paramètres d'ajustement du *rhéogramme moyen*, l la largeur du canal, θ la pente du canal, u_b la vitesse de défilement du tapis et H_N la hauteur de l'écoulement dans la zone uniforme. Tous les matériaux ont été échantillonnés après l'essai sur le canal (*ap*).

5.1.2 Description qualitative de l'écoulement

Tous les essais réalisés ont systématiquement donné lieu à l'établissement d'un écoulement stationnaire présentant un front immobile dans le référentiel du laboratoire, dans au moins une partie de la gamme de vitesse explorée. Toutefois, nous avons généralement pu observer l'existence d'une vitesse de tapis critique, variable en fonction des essais, au-delà de laquelle l'écoulement se déstabilisait (battements du front et oscillations de la surface libre). Dans la suite, nous nous concentrerons exclusivement sur le régime stationnaire. Seules les vitesses explorées dans ce régime¹ sont reportées dans les tableaux 5.1 et 5.2.

Dans le régime stationnaire, la forme des coulées est indépendante de la manière dont le fluide est déposé sur le tapis. En observant une coulée à travers la rive du canal, nous pouvons distinguer trois zones (voir la figure 5.2). À l'avant de la coulée, il se forme un front immobile et raide. Le plus souvent, il apparaît même une petite zone réentrante au niveau de la ligne de contact entre le fluide et le tapis qui lui confère une forme de lobe. Derrière, la surface libre s'aplanit progressivement jusqu'à devenir parallèle au fond. Dans la suite, c'est à l'épaisseur de cette zone uniforme (appelée hauteur normale H_N) que nous nous intéresserons particulièrement. Les plages de valeurs de cette épaisseur mesurées pour chaque essai sont indiquées dans les tableaux 5.1 et 5.2. Enfin, au voisinage de la paroi amont, l'épaisseur de la coulée tend à augmenter localement. La longueur de cette zone où l'écoulement est perturbé par la condition limite n'excède pas 10-15 cm.

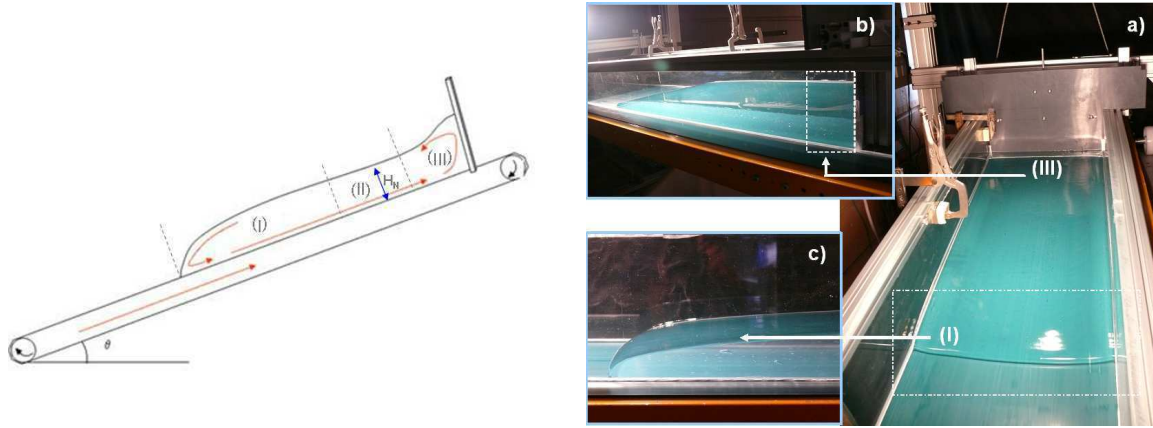


FIGURE 5.2 – Allure d'une coulée stationnaire sur le canal expérimental à fond mobile : le front (I), zone uniforme d'épaisseur constante désignée par la hauteur H_N (II) et zone influencée par la paroi amont (III).

Lorsqu'on change la vitesse du tapis, l'écoulement s'adapte spontanément et retrouve rapidement une nouvelle configuration stationnaire. Notamment, on observe que l'épaisseur de la zone uniforme augmente systématiquement avec la vitesse (voir la partie 5.2.1). Le temps typique de stabilisation de la coulée avant d'atteindre le régime stationnaire est inférieur à une minute. En pratique, après chaque changement de vitesse, nous attendons de l'ordre de 1 à 3 minutes avant de démarrer les mesures.

1. Sans pour autant que la vitesse supérieure de la gamme indiquée ne corresponde toujours à la vitesse critique de déstabilisation.

5.1.3 Profil de vitesse dans l'écoulement

Nous n'avons pas, au cours de cette étude, conduit de mesure précise des profils de vitesse dans les coulées. Toutefois, le suivi des bulles d'air présentes dans l'écoulement, ou de petits traceurs, nous permet d'avoir une appréciation qualitative de ces profils dans les différentes zones de la coulée (voir la figure 5.3). Dans la région uniforme, le fluide se déplace parallèlement à la surface libre sur toute l'épaisseur de la coulée (vitesse verticale nulle). Conformément au profil théorique décrit dans la figure 4.1, les éléments de fluide vont vers l'aval dans la partie supérieure de l'écoulement, et vers l'amont dans la partie inférieure de manière à ce que la vitesse moyenne soit nulle. Il existe donc une zone de vitesse nulle au sein de l'écoulement. Dans les régions proches du front et de la paroi amont, les trajectoires s'incurvent fortement, avec des vitesses verticales importantes. Ces zones assurent la recirculation du matériau.

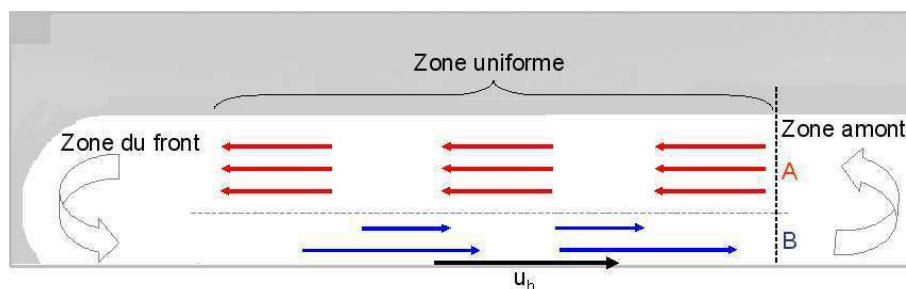


FIGURE 5.3 – Schématisation du suivi des trajectoires majeures de traceurs incorporés dans une solution transparente de carbopol.

Quel que soit le matériau employé, nous n'avons pas observé de glissement significatif du fluide sur le tapis lors de nos expériences. En particulier, les mesure de hauteur expérimentales semblent en bon accord avec les prédictions théoriques calculées sans glissement (voir 5.5.1). Il apparaît donc que la rugosité du tapis (de l'ordre du micromètre) soit suffisante pour prévenir ce phénomène de glissement.

5.1.4 Stationnarité de l'écoulement

Dans ce paragraphe, nous démontrons que les coulées obtenues sur le canal lorsque la vitesse est inférieure à la vitesse critique sont effectivement stationnaires. D'une part, comme nous l'avons déjà signalé, les fronts de ces coulées sont immobiles dans le référentiel du laboratoire. D'autre part, de façon quantitative, les figures 5.4 et 5.5 représentent l'évolution de la hauteur de l'écoulement en fonction du temps, dans la zone uniforme, pour des niveaux croissants de vitesse, et pour une solution de kaolin et de carbopol. La disposition des capteurs à ultrasons utilisés pour ces mesures est schématisée sur la figure 5.1. On observe que ces mesures de hauteur sont bien constantes sur toute la durée d'enregistrement, et pour les deux capteurs représentés. L'écart type maximum des fluctuations de hauteur est de 0.25 mm pour le kaolin (figure 5.4) et de 0.10 mm pour le carbopol (figure 5.5), ce qui est faible par rapport aux hauteurs mesurées. Une partie de ces fluctuations est probablement due au bruit électronique, et une partie peut aussi s'expliquer par des micro-reliefs de la surface libre qui persistent du fait de la présence du *plug*. Dans la suite, ces fluctuations seront intégrées dans

le bruit de mesure sur H_N (voir la partie 4.3.3).

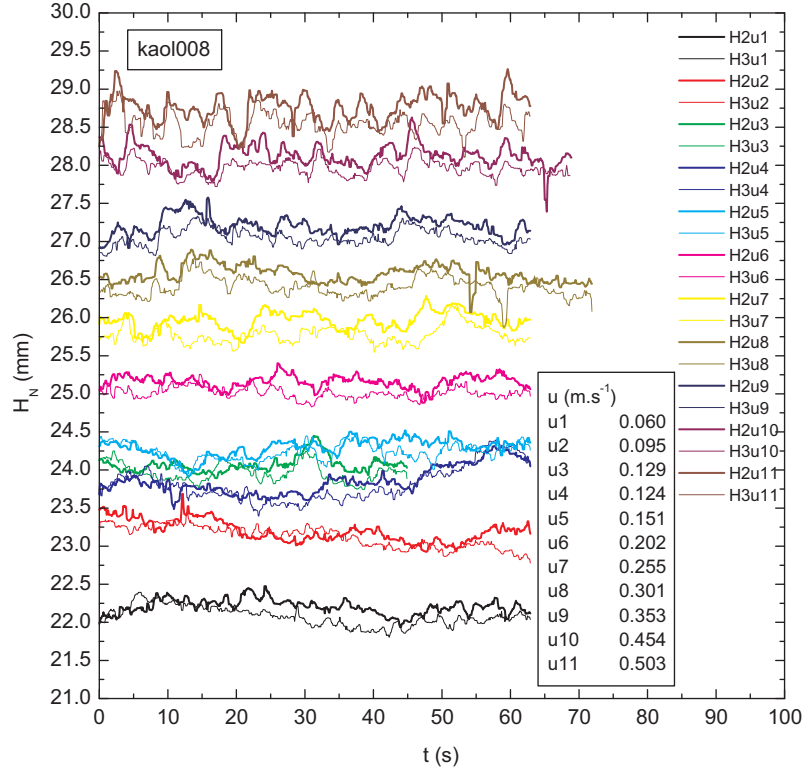


FIGURE 5.4 – Hauteur de l'écoulement en fonction du temps, mesurée avec les deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3 , pour une solution de kaolin (*kaol008*)

5.1.5 Effets de bords

La figure 5.6 présente l'allure du profil de vitesse à la surface libre des coulées dans les cas du carbopol et du kaolin. Ces profils sont obtenus en plaçant une ligne de traceurs à la surface des écoulements. Ces résultats montrent qu'il existe près des rives des zones cisailées. Cependant, la largeur de ces zones n'excède jamais 10 cm, soit 25% de la largeur du canal (0.4 m). Ainsi il existe toujours au centre des coulées une zone où le gradient transversal de vitesse est nul, et qui n'est donc pas affectée par les parois.

Plus quantitativement, la figure 5.8 compare des mesures de hauteur ponctuelles effectuées simultanément au centre et au bord de la coulée pour une solution de carbopol. La disposition des capteurs pour cet essai est indiquée dans la figure 5.7. On observe que la mesure au bord est systématiquement plus élevée que celle obtenue au centre. Toutefois, la différence reste faible et à peine supérieure aux barres d'erreur. Par ailleurs, la différence est apparemment

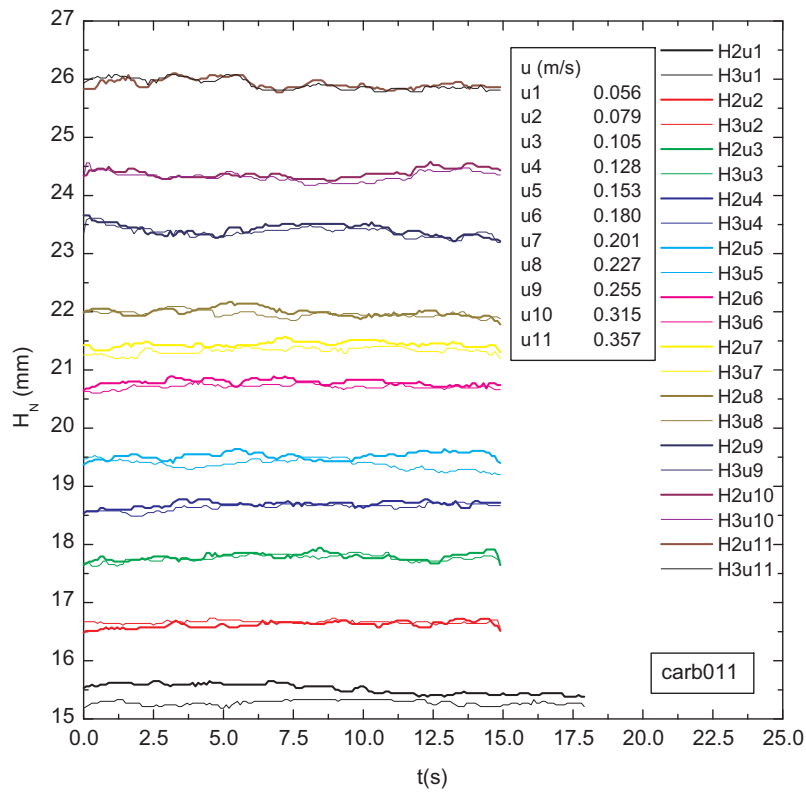


FIGURE 5.5 – Hauteur de l'écoulement en fonction du temps, mesurée avec les deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3 , pour une solution de carbopol (*carb011*)

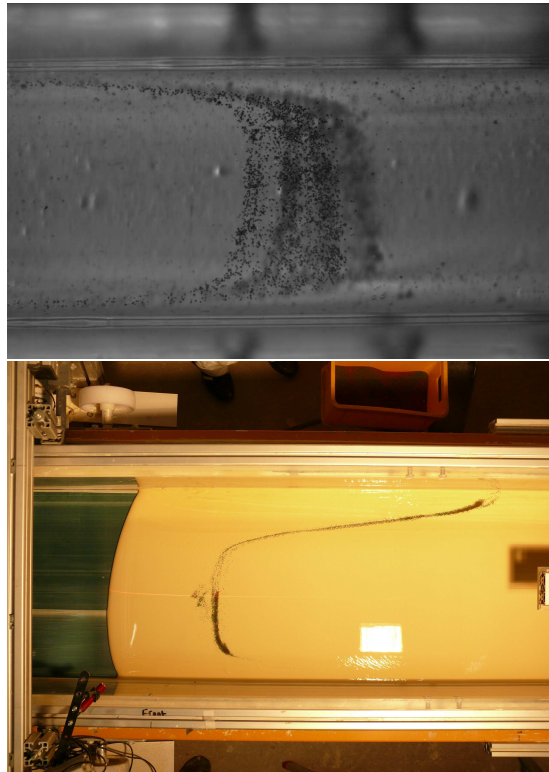


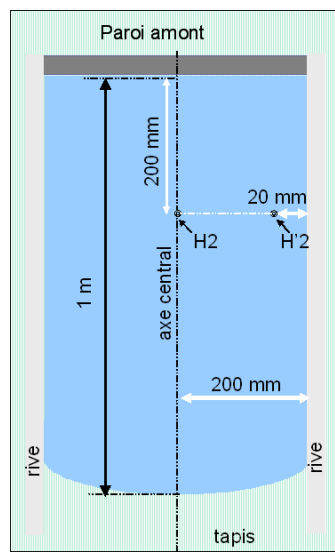
FIGURE 5.6 – Profil de vitesse transverse à la surface libre pour une coulée stationnaire de carbopol (en haut) et de kaolin (en bas).

indépendante de la vitesse. Au final, on peut donc conclure que les effets de bord restent limités dans notre dispositif, et n'influent pas significativement sur les mesures de hauteurs dans la zone uniforme. Les coulées observées peuvent raisonnablement être considérées comme bidimensionnelles dans la zone centrale.

Il apparaît donc que les effets de bord dans notre dispositif sont bien plus limités que ceux observés avec des fluides similaires dans des canaux "classiques" [23, 34]. Cette faible incidence des parois latérales sur l'écoulement peut s'expliquer par le fait qu'en moyenne, la vitesse du fluide au sein de la coulée est égale à celle des rives dans notre dispositif.

5.1.6 Existence de la zone de hauteur normale

Les figures 5.9 et 5.10 démontrent clairement l'existence d'une zone uniforme dans les coulées obtenues sur notre dispositif. La différence de mesure entre trois capteurs disposés le long de la coulée à l'aplomb de cette zone (voir la figure 5.1) est toujours inférieure à l'incertitude. On note néanmoins que les mesures avec le capteur laser H_1 , situé à l'amont, sont systématiquement plus élevées que celles réalisées avec les deux autres capteurs (voir la figure 5.9), même si, encore une fois, l'écart reste compris dans l'incertitude de mesure. Ce capteur étant placé à seulement 20 cm de la paroi amont, cette légère sur-hauteur pourrait être due à l'effet de la paroi qui commencerait à se faire sentir.

FIGURE 5.7 – Disposition des capteurs à ultrasons pour l'essai *carb008a*.

5.2 Résultats expérimentaux

5.2.1 Cas du carbopol

La figure 5.11 montre l'évolution de la hauteur de l'écoulement, dans la zone uniforme, avec la vitesse du tapis pour différentes expériences. Les caractéristiques des essais illustrés sur cette figure sont décrites dans le tableau 5.1. Il apparaît très clairement que la hauteur de l'écoulement augmente avec la vitesse du tapis, avec un taux de variation progressivement décroissant. On note aussi qu'à vitesse du tapis et propriétés rhéologiques fixées, la hauteur de l'écoulement diminue avec la pente (voir la figure 5.12).

Par ailleurs, la figure 5.13 montre que pour une pente et une vitesse données, la hauteur de l'écoulement augmente avec le niveau de la contrainte seuil du matériau. On note aussi sur cette figure que, comme on pouvait l'attendre, deux matériaux possédant des propriétés rhéologiques similaires donnent lieu à pente constante à des courbes vitesse-hauteur identiques (voir la figure 5.13). Ceci démontre la bonne répétabilité de nos essais.

5.2.2 Cas du kaolin

Les résultats obtenus avec le kaolin montrent des tendances identiques à celles décrites pour le carbopol : augmentation de l'épaisseur avec la vitesse (figure 5.14) et avec la contrainte-seuil (figure 5.15) et diminution avec la pente (figure 5.16).

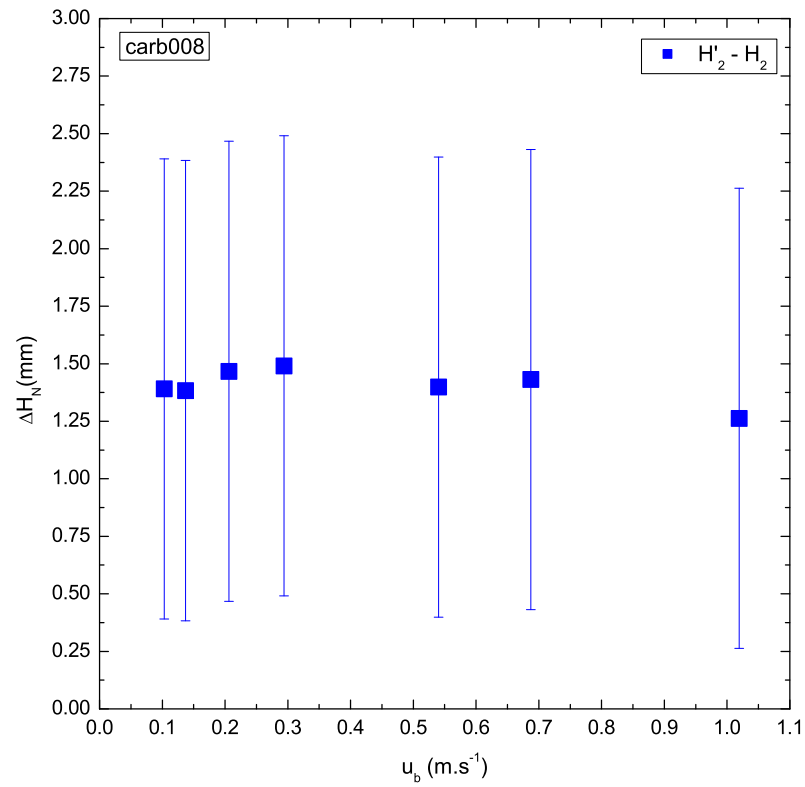


FIGURE 5.8 – Différence de mesure de hauteur d'écoulement entre le centre et le bord de la coulée pour l'essai *carb008a*. Voir la disposition des capteurs sur la figure 5.7.

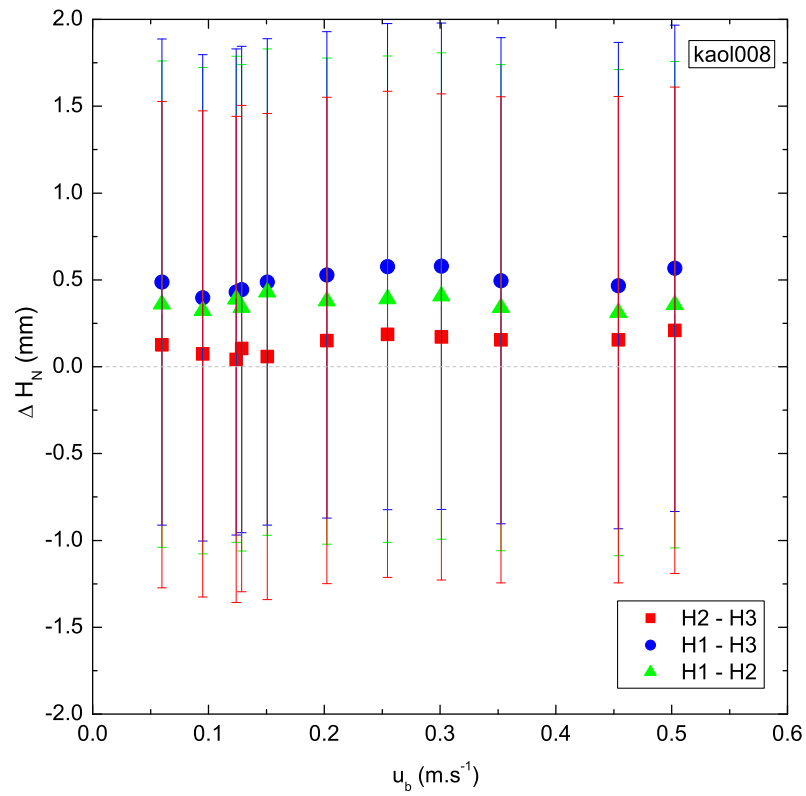


FIGURE 5.9 – Mesures de hauteur d'écoulement de kaolin obtenues avec trois capteurs : un capteur laser H_1 et deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3 .

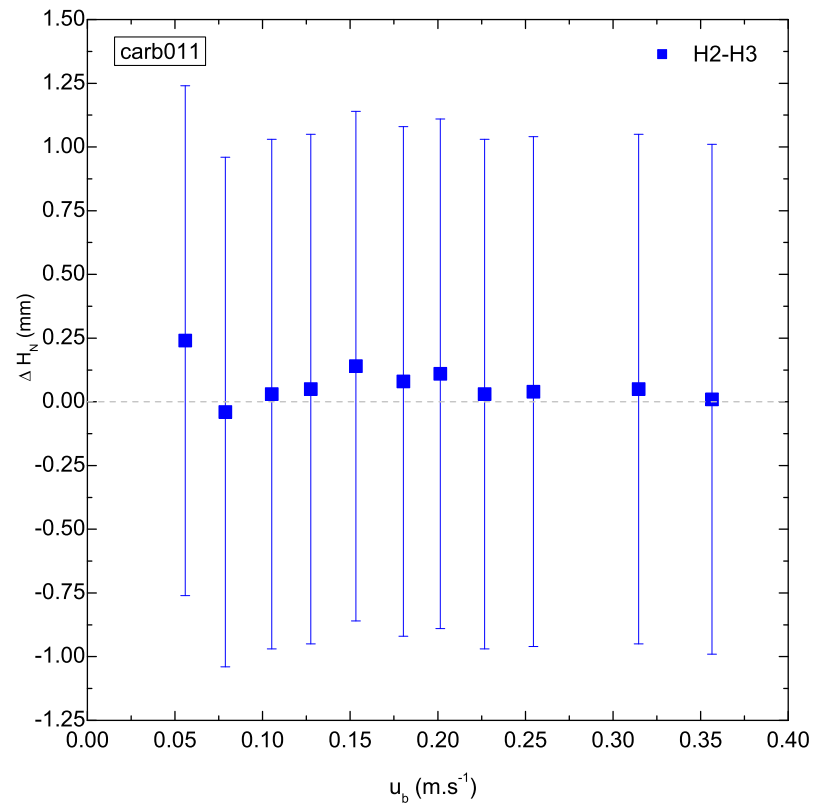


FIGURE 5.10 – Mesures de hauteur d'écoulement de carbopol obtenues avec deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3 .

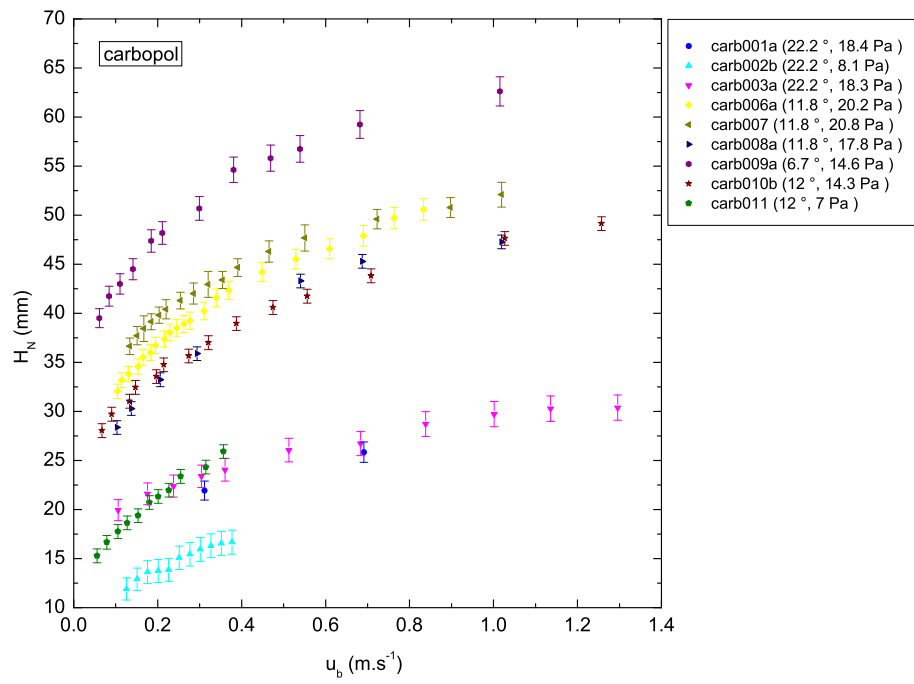


FIGURE 5.11 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour différentes solutions de carbopol et différentes pentes.

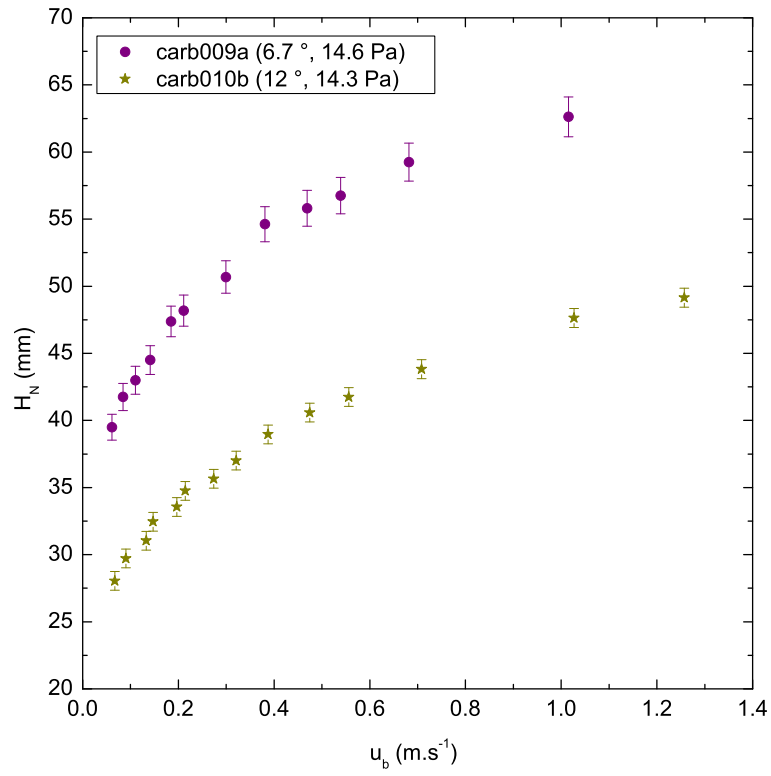


FIGURE 5.12 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour deux pentes (6.7° et 12°) à propriétés rhéologiques quasi-fixées.

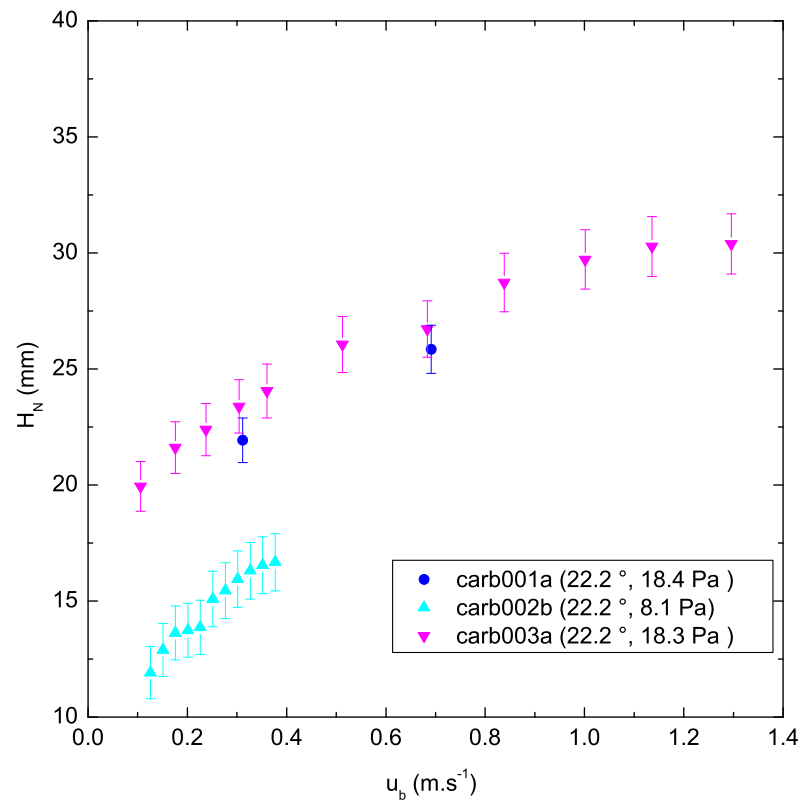


FIGURE 5.13 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour une pente de 22.2° et différentes solutions de carbopol.

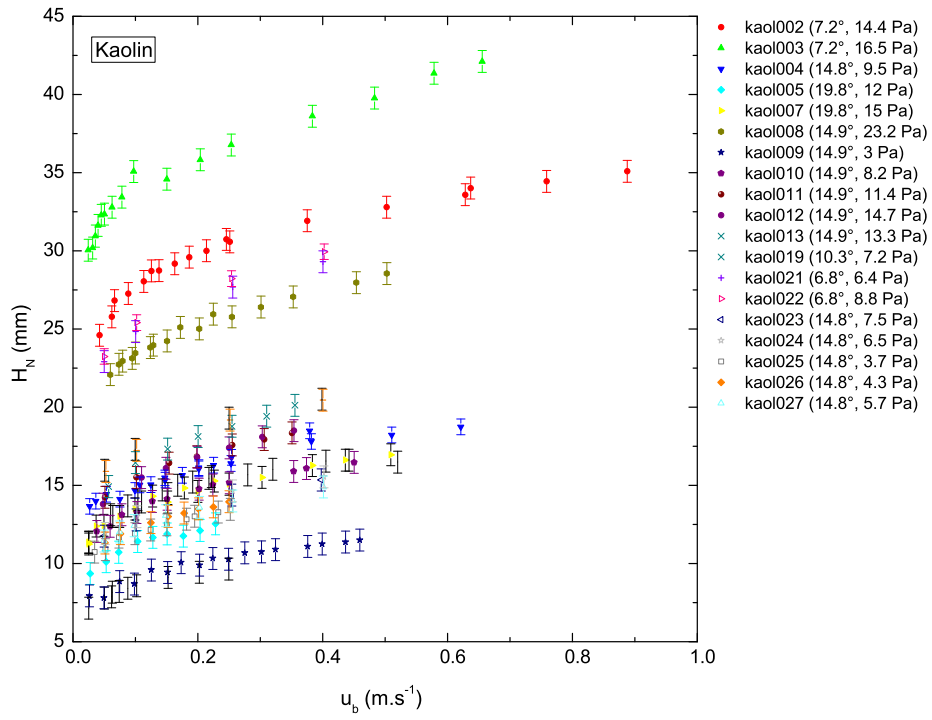


FIGURE 5.14 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N , avec la vitesse du tapis u_b , pour différentes préparations de kaolin (pente, contrainte seuil).

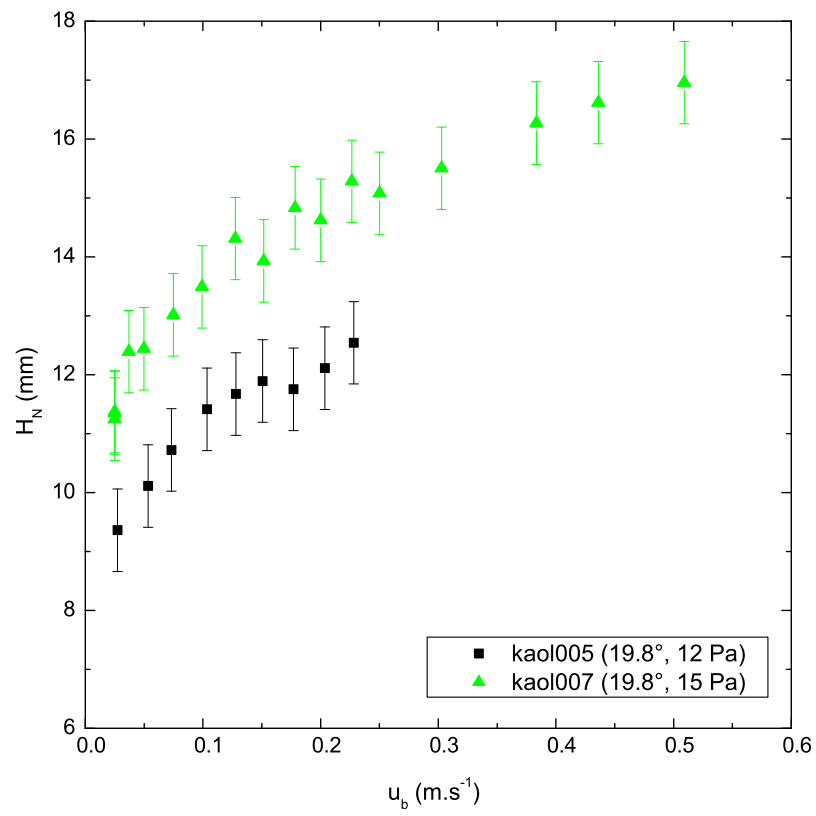


FIGURE 5.15 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour une pente de 19.8° et différentes solutions de carbopol.

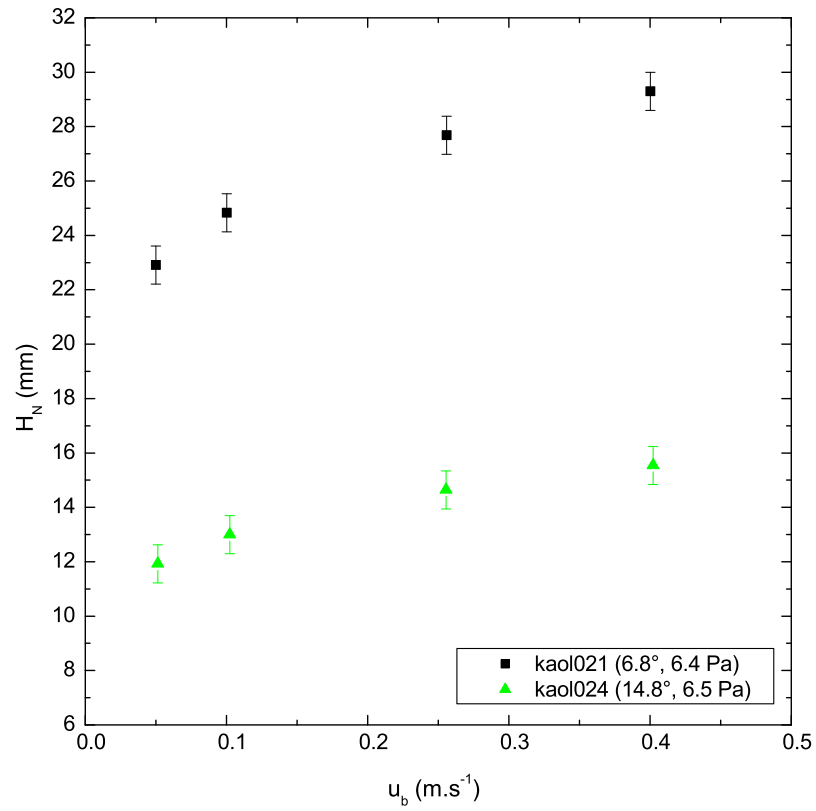


FIGURE 5.16 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour deux matériaux, avec un seuil de contrainte similaire (6.5 Pa), pour 2 pentes différentes (6.80° et 14.8°).

5.3 Prédiction théorique et comparaison avec les expériences

5.3.1 Courbes vitesse-hauteur

Modèle théorique

Nous voulons comparer les mesures de hauteur pour différentes vitesses aux prédictions théoriques correspondant à un écoulement bidimensionnel permanent et uniforme sur fond mobile. Pour un fluide de Herschel-Bulkley de paramètres rhéologiques τ_c , k et n , la relation entre vitesse moyenne et épaisseur de l'écoulement (voir la partie 2.2.1) s'écrit dans ce cas comme suit :

$$\bar{u} = \frac{n+1}{n} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{n}{2n+1} \frac{h_0}{H_N} \right) h_0^{\frac{n+1}{n}} - u_b, \quad (5.1)$$

où $h_0 = H_N - \tau_c/(\rho g \sin \theta)$, ρ est la densité du fluide, θ est l'angle de pente du canal, g l'accélération de la pesanteur et u_b représente la vitesse basale imposée. De plus, comme nos expériences concernent des écoulements immobiles en moyenne, on a $\bar{u} = 0$. Par conséquent, on obtient le modèle théorique suivant reliant la vitesse basale à l'épaisseur de l'écoulement :

$$u_b = \frac{n+1}{n} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{n}{2n+1} \frac{h_0}{H_N} \right) h_0^{\frac{n+1}{n}} \quad (5.2)$$

En pratique, connaissant les propriétés rhéologiques des matériaux utilisés, nous pouvons donc générer des courbes vitesse-hauteur théoriques selon l'équation 5.2 et les comparer aux mesures expérimentales. Dans l'annexe E, nous représentons systématiquement pour chaque expérience les éléments suivants (voir exemple sur la figure 5.17) :

- Les points de données *vitesse-hauteur* expérimentaux.
- Les courbes théoriques *vitesse-hauteur* générées à partir des paramètres d'ajustement des rhéogrammes moyens (annexe C pour le carbopol et annexe D pour le kaolin) décrits dans le chapitre 3. Ces derniers sont obtenus indépendamment grâce aux tests rhéométriques effectués sur les échantillons de matériaux prélevés avant et après essais quand ils sont disponibles. Pour un certain nombre de cas, nous ne disposons que d'échantillons prélevés après essais. Dans ce cas, nous pouvons estimer les paramètres rhéologiques avant essai en se basant sur les données directes obtenues avec des échantillons qui possèdent des mesures avant et après essai. Cela consiste à estimer l'évolution moyenne de ces paramètres rhéologiques entre essais avant et après essai sur le canal. Dans tous les cas, le seuil de contrainte a tendance à baisser (de 15 % en moyenne) mais rapport k/τ_c et n sont constants pour les mesures avant et après essai sur le canal (voir la partie 3.3.4). On peut donc ajouter à la valeur du seuil de contrainte estimée après essai, le taux de baisse observée pour retrouver la valeur supposée avant l'essai sur le canal, en gardant n et k/τ_c constants.
- Les fuseaux d'incertitude associés aux incertitudes sur les courbes d'écoulement, toujours pour les cas avant et après essai. Les enveloppes d'incertitude sur les rhéogrammes (annexe C pour le carbopol et D pour le kaolin) étant décrits par des ajustements de

type Herschel-Bulkley (voir le chapitre 3), ces fuseaux sur les courbes vitesse-hauteur peuvent également être calculés à partir de l'équation 5.2.

On remarque sur la figure 5.17 que l'incertitude sur les paramètres rhéologiques se traduit par une incertitude très significative sur les hauteurs calculées pour chaque valeur de vitesse. Ainsi, l'incertitude sur la hauteur, pour cette expérience, peut-elle atteindre des niveaux de l'ordre de 10% pour les vitesses les plus élevées². On observe aussi que, pour une hauteur donnée, le niveau d'incertitude sur la vitesse est encore nettement plus élevé (plus de 50%). De ce point de vue, le contrôle des expériences en vitesse apparaît bien comme le plus judicieux.

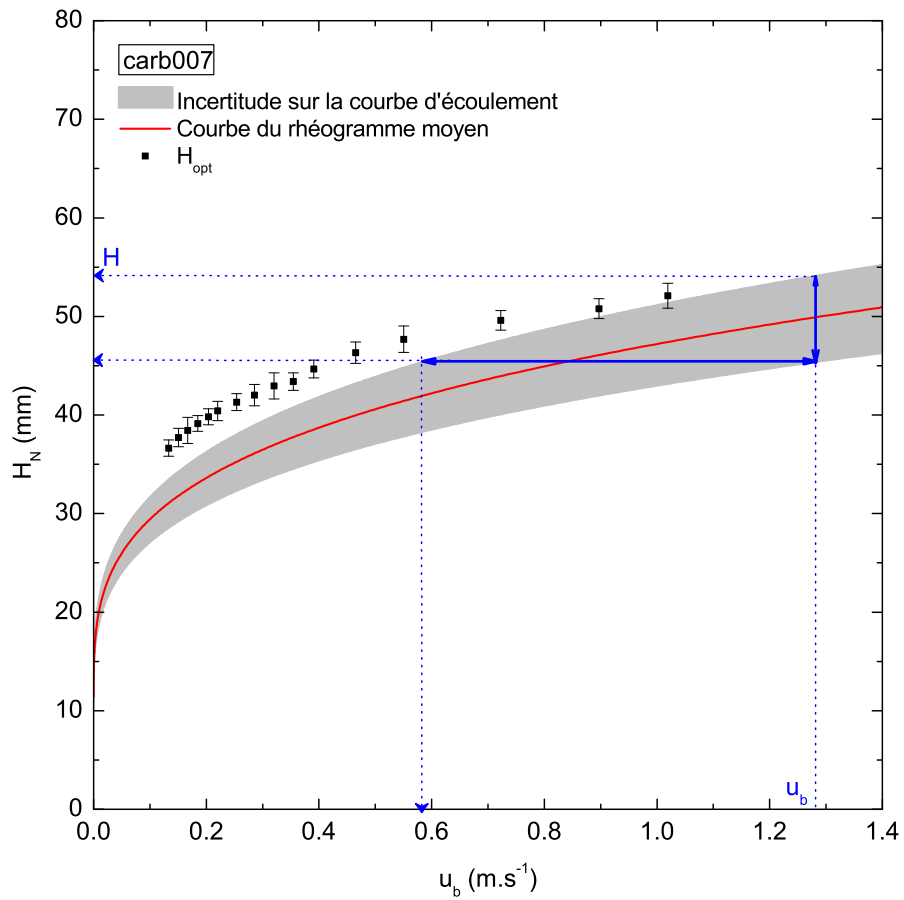


FIGURE 5.17 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau *carb007* : Incertitudes sur la vitesse et sur la hauteur.

2. C'est-à-dire de l'ordre de 10 à 25% pour les expériences avec du carbopol.

Nombre sans dimension	carbopol	kaolin
$G = \frac{\rho g H_N \sin \theta}{\tau_c}$	[3.09; 7.62]	[2.88; 12.98]
$H_b = \frac{\tau_c}{k} \left(\frac{H_N}{u_b} \right)^n$	[0.36; 1.28]	[0.13; 0.84]
$F_r = \frac{u_b}{\sqrt{g H_N \cos \theta}}$	[0.1; 2.5]	[0.05; 1.52]

TABLE 5.3 – Nombres sans dimension caractéristiques des expériences réalisées avec le carbopol et le kaolin.

5.3.2 Comparaison modèle théorique – expériences

Pour le kaolin, on observe que l’augmentation de la hauteur de l’écoulement avec la vitesse du tapis est correctement reproduite par le modèle, dans la limite des barres d’erreur affectant les mesures de hauteur et les paramètres rhéologiques (annexe F).

Pour le carbopol, on rappelle tout d’abord que les propriétés rhéologiques du matériau ont tendance à diminuer nettement après utilisation sur le canal (3.3.6). Ceci se traduit par une incertitude encore plus importante sur les courbes vitesse-hauteur calculées.

La comparaison avec les expériences montre que les données sont régulièrement en meilleur accord avec les courbes théoriques correspondant aux paramètres rhéologiques mesurés avant essai (5.18).

Sur certains essais (5.19), on remarque toutefois que pour les points de mesure correspondant aux vitesses les plus grandes (pris à la fin des expériences), l’accord avec la théorie est au contraire plutôt meilleur en prenant en compte les propriétés rhéologiques mesurées après essai. Ceci traduit la dégradation des propriétés rhéologiques au cours de l’expérience.

Pour laplupart des essais (voir les figures 5.18 et 5.20), on note aussi que les hauteurs expérimentales restent supérieures aux prédictions théoriques, et ce même en considérant les paramètres avant essai. Les explications possibles de ce désaccord seront discutées plus loin (voir la partie 5.5.1).

5.4 Normalisation

5.4.1 Nombres sans dimension

Une autre manière de représenter nos données expérimentales consiste à étudier les relations entre les grandeurs sans dimension définies dans le tableau 5.3 (voir aussi la partie 1.2.2). Les gammes de variation de ces nombres au cours de nos expériences sont également indiquées dans ce tableau.

5.4.2 Incertitude sur les nombres sans dimension

L’incertitude sur les nombres adimensionnels H_b , G et F_r résulte des incertitudes existant sur les mesures de hauteur normale et sur les paramètres rhéologiques. Pour une grandeur f qui dépend des variables x_i , l’incertitude Δf est reliée aux incertitudes Δx_i par $\Delta f = \sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i$.

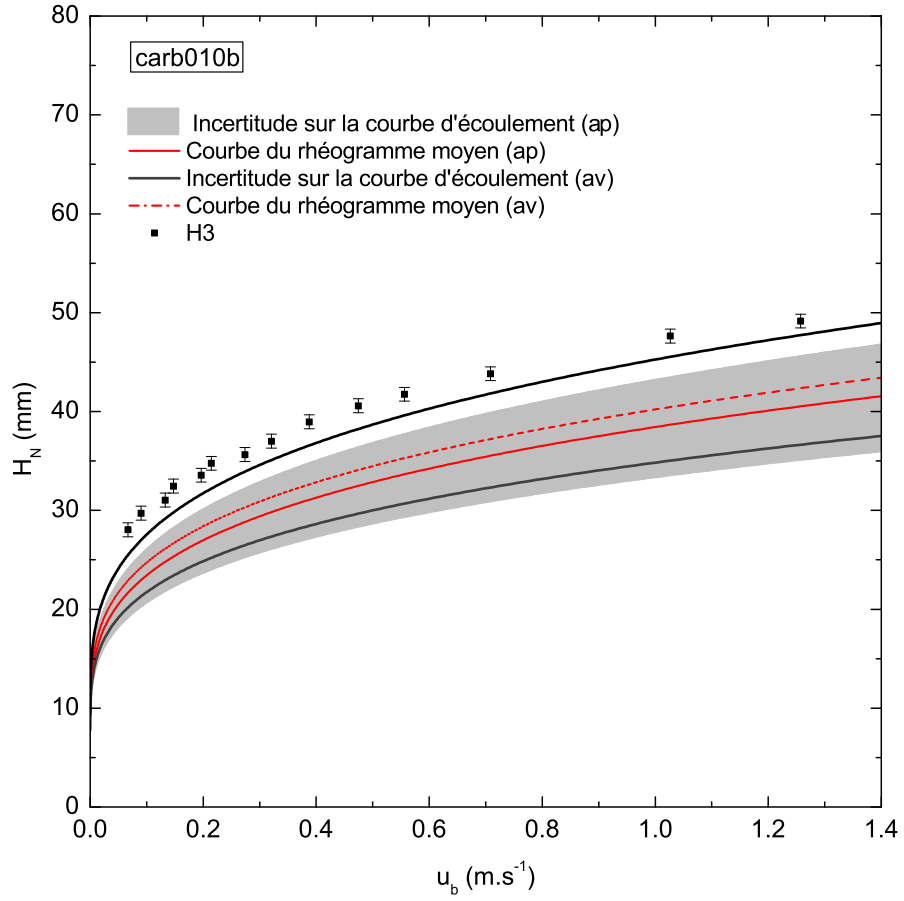


FIGURE 5.18 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau *carb010b* avec les paramètres rhéologiques avant et après essai sur le canal.

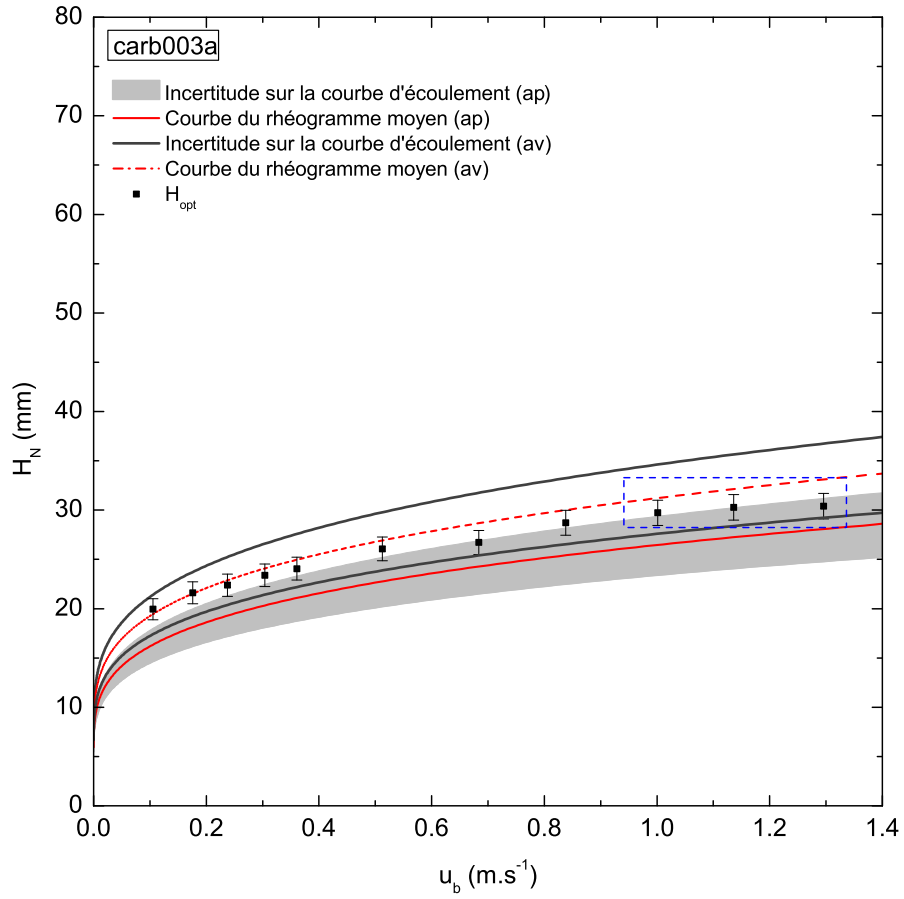


FIGURE 5.19 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau *carb003a*.

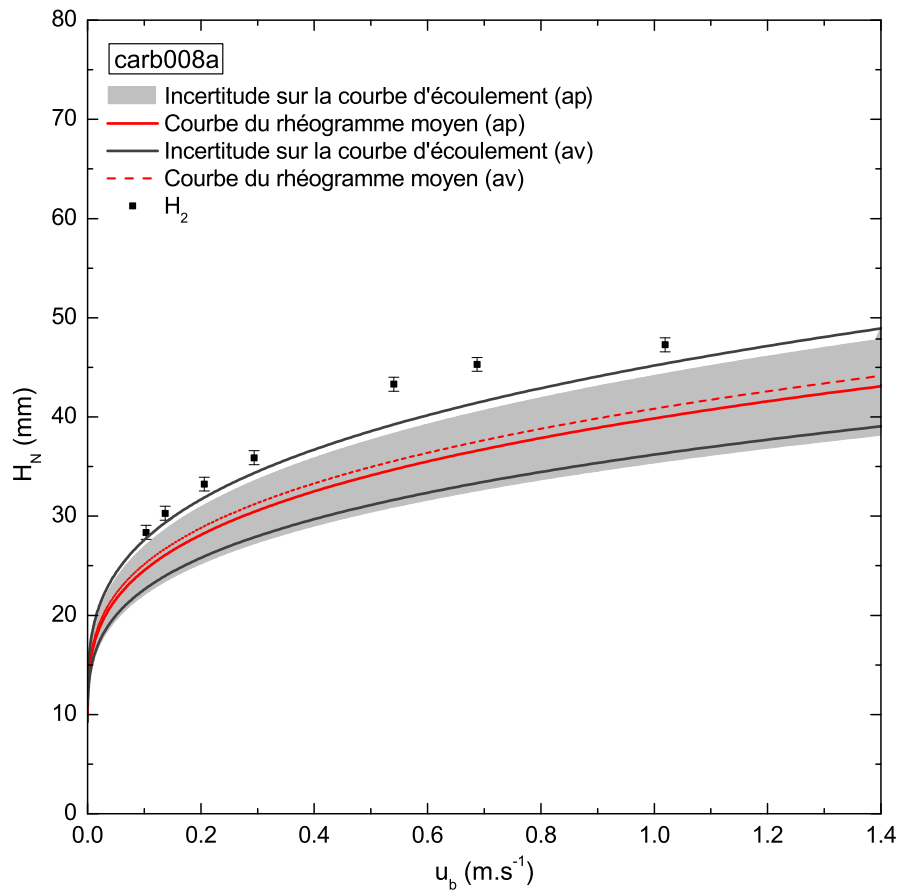


FIGURE 5.20 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau *carb008a*.

Dans cette formulation, nous négligeons les covariances éventuelles existant entre les paramètres x_i . En appliquant ce procédé et en considérant que les incertitudes sur l'indice d'écoulement n , sur la vitesse de défilement du tapis u_b , sur la densité ρ , sur l'accélération de la gravité g et sur l'angle de pente θ sont négligeables devant celles affectant la mesure de hauteur H_N et les paramètres rhéologiques τ_c et k , on obtient :

$$\frac{\Delta F_r}{F_r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta H_N}{H_N}, \quad (5.3)$$

$$\frac{\Delta H_b}{H_b} = \frac{\Delta \tau_c}{\tau_c} + \frac{\Delta k}{k} + n \cdot \frac{\Delta H_N}{H_N}, \quad (5.4)$$

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta H_N}{H_N} + \frac{\Delta \tau_c}{\tau_c}, \quad (5.5)$$

La détermination de l'incertitude sur la mesure de hauteur normale ΔH_N , intervenant dans ces expressions, est détaillée dans les parties 4.3.2 et 4.3.3. Concernant les paramètres rhéologiques τ_c et k , la détermination des incertitudes associées est expliquée dans la partie 3.3.4.

5.4.3 Normalisation de la loi d'écoulement

Pour un écoulement permanent uniforme, la normalisation de la relation vitesse-hauteur (voir l'expression 5.1) permet d'obtenir la relation suivante entre les nombres adimensionnels H_b et G [23] :

$$H_b^{-m} = \frac{1}{(m+1)(m+2)} G^{-2} (G-1)^{m+1} ((m+1)G+1), \quad (5.6)$$

où $m = 1/n$.

Cette relation présente l'intérêt de ne dépendre que de l'indice n , paramètre qui est quasi-constant pour chaque fluide³. La figure 5.21 montre que les courbes théoriques, H_b en fonction de G , obtenues en couvrant la plage de variation de n observée pour chacun des deux fluides sont quasi-confondues. Dans la suite, ces courbes seront tracées en retenant les valeurs $n = 0.4$ pour le carbopol et $n = 0.2$ pour le kaolin. Ainsi, il est possible de comparer de manière unifiée la prédiction théorique à l'ensemble des expériences réalisées sur un même fluide quelque soit la valeur de la pene θ et des paramètres rhéologiques τ_c et k .

Application aux expériences

Cas du carbopol : La figure 5.23 montre que les données expérimentales sont bien en accord avec la formulation théorique de l'équation 5.6. Mais nous constatons une légère différence quantitative de sorte que tous les points expérimentaux sont systématiquement au dessus de la courbe théorique. Cependant le domaine d'incertitude sur les résultats recoupe bien la courbe théorique.

3. La gamme de variation de n est de [0.371; 0.428] pour le carbopol et de [0.154; 0.200] pour le kaolin.

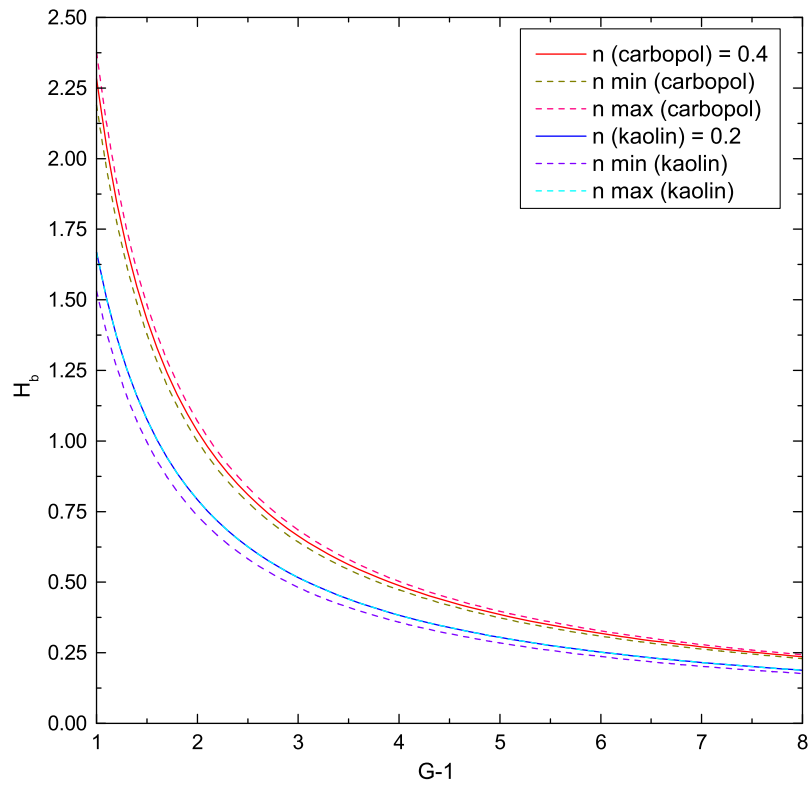


FIGURE 5.21 – Relation entre nombre adimensionnel H_b et nombre adimensionnel G prédit par la relation 5.6 pour différentes valeurs de n : cas du carbopol ($n_{max} = 0.428$, $n_{min} = 0.371$ et $n = 0.4$) et cas du kaolin ($n_{max} = 0.200$, $n_{min} = 0.154$ et $n = 0.2$).

Les points de données obtenus avec les mesures de rhéométrie réalisées sur des échantillons prélevés avant essai sur le canal montrent systématiquement un meilleur accord avec la théorie que les points obtenus avec des mesures après essai sur le canal.

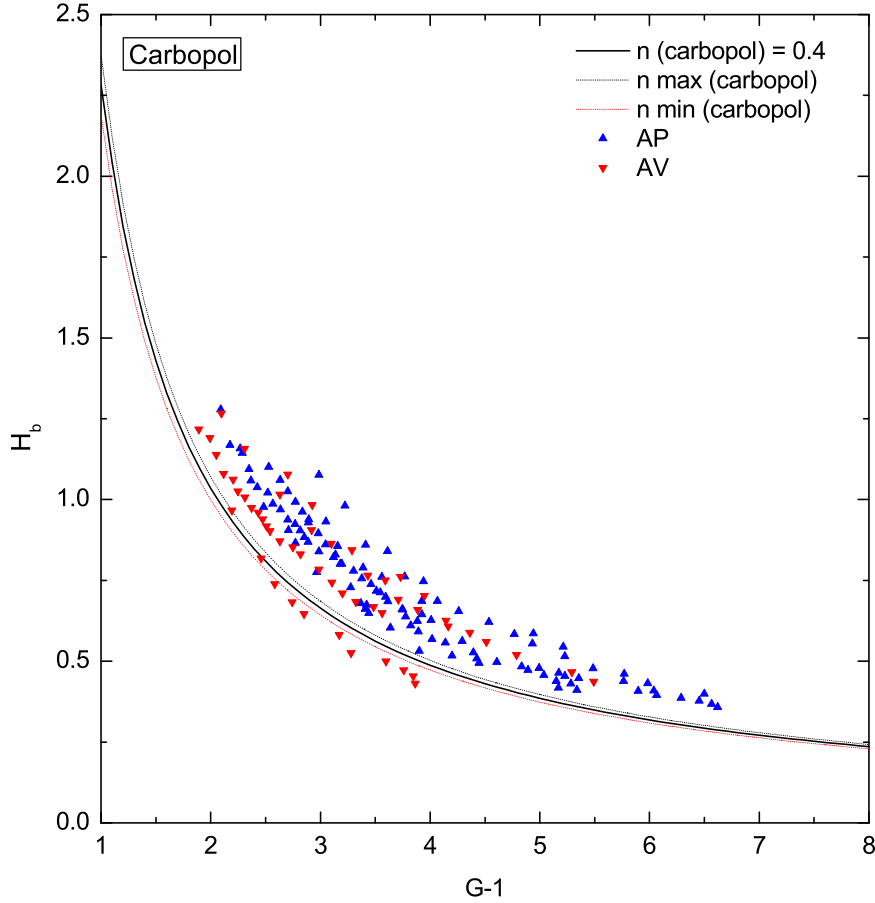


FIGURE 5.22 – Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points. La courbe théorique est la courbe pleine. *AV* et *AP* désignent respectivement les points de données obtenus avec les mesures de rhéométrie sur des échantillons prélevés avant et après essai sur le canal.

Cas du kaolin : Sur les figures 5.24 et 5.25 nous observons que les points de données expérimentales sont en accord avec la formulation théorique de l'équation 5.6 à la dispersion de données près. Signalons que les points présentés regroupent des données obtenues pur différentes largeurs (voir la figure 5.25). Ainsi, l'accord reste bon quelque soit la largeur.

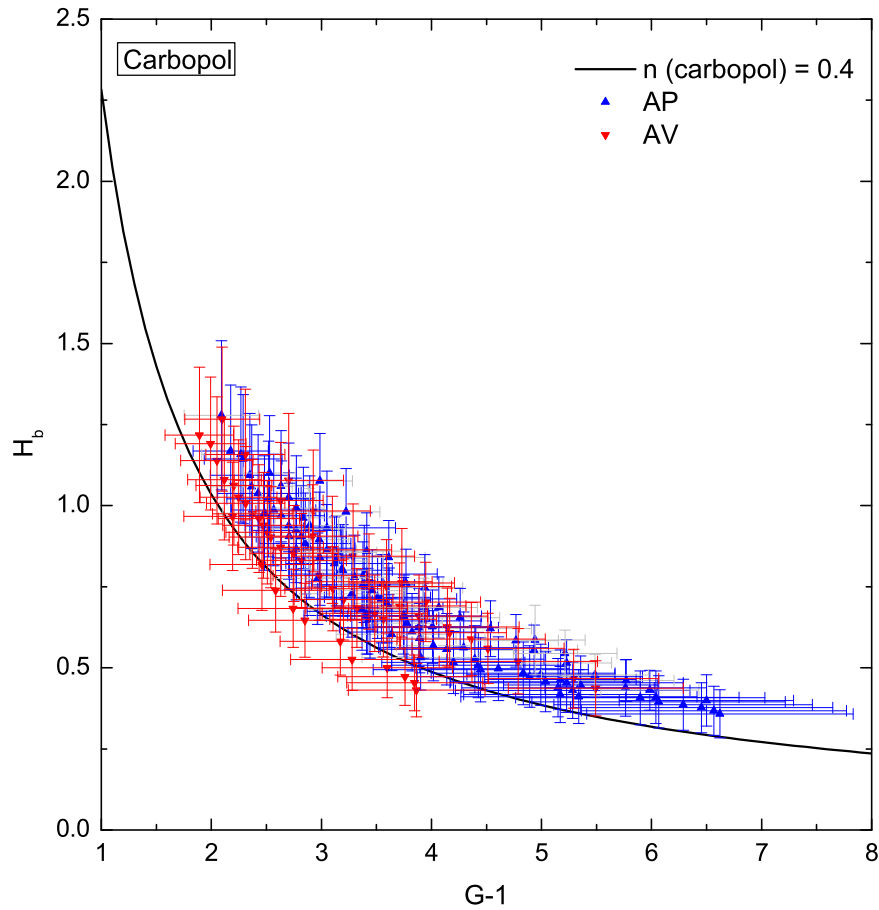


FIGURE 5.23 – Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points avec des barres d'erreur. La courbe théorique est la courbe pleine. *AV* et *AP* désignent respectivement les points de données obtenus avec les mesures de rhéométrie sur des échantillons prélevés avant et après *le même essai* sur le canal.

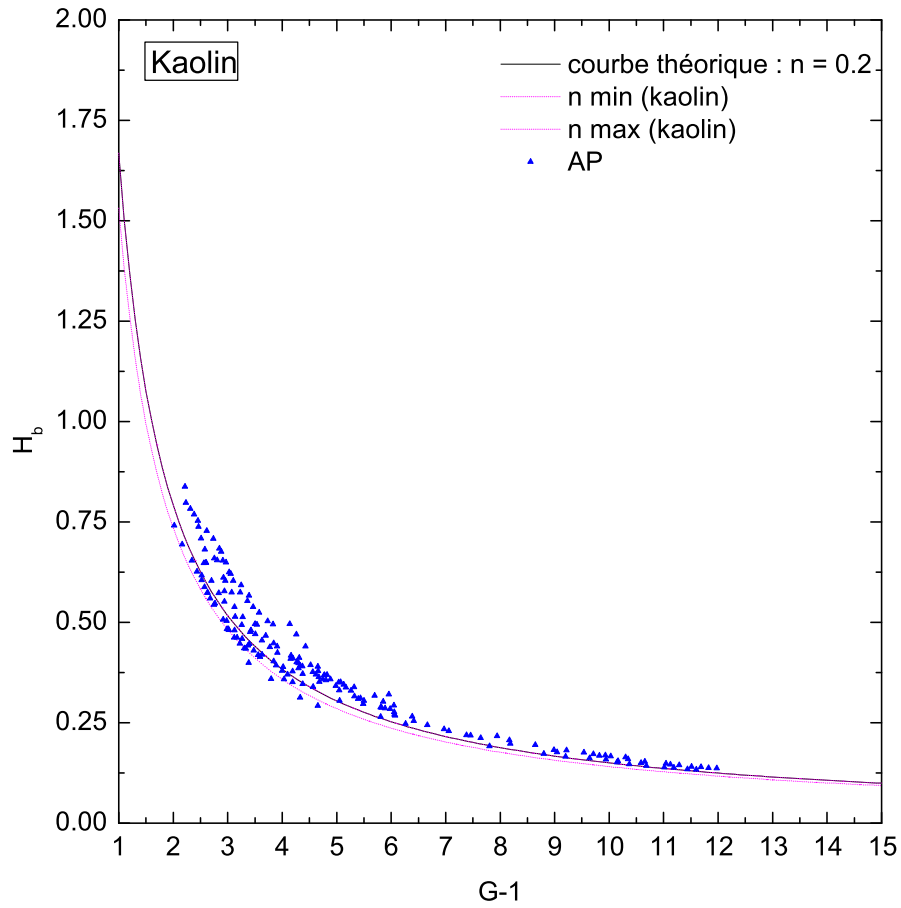


FIGURE 5.24 – Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points. La courbe théorique est la courbe pleine.

5.5 Modélisation de la forme de la coulée

[voir article [17] en annexe)]

Nous avons conduit une série d'expériences sur le canal expérimental avec des solutions de kaolin possédant un seuil de contrainte de l'ordre de 10 Pa. Nous avons étudié la forme de la surface libre en y projetant une ligne laser avec un faible angle d'incidence. Nous avons également utilisé des capteurs à ultrasons pour effectuer des mesures ponctuelles de hauteur d'écoulement. Les coulées stationnaires obtenues ont systématiquement présenté des fronts raides suivis de zone de hauteur constante. Nous avons reporté l'évolution des caractéristiques de l'écoulement (hauteur normale et forme du front) en fonction de la vitesse du tapis. Nous avons comparé ces résultats aux prédictions théoriques d'un modèle basé sur une approximation de couche mince. En cherchant des solutions d'ondes progressives pour les équations classiques de couche mince, nous avons obtenu une équation différentielle ordinaire pour la forme des ondes, qui dans le cas d'un fluide de Herschel-Bulkley est intégrée numériquement. L'accord entre les formes de la surface libre obtenues à partir de ce modèle et celles issus des expériences sur le canal est bon, y compris dans la zone du front.

5.5.1 Discussion

Les variations des propriétés rhéologiques du carbopol en cours d'essai sont importantes ce qui explique que l'accord entre les mesures et la théorie soit moins bon que dans le cas du kaolin. En général, en prenant en compte les paramètres rhéologiques avant l'essai sur le canal, éventuellement extrapolées lorsqu'il n'y a pas de mesures, on obtient un meilleur accord.

Pour plus de lisibilité sur l'ordre de grandeur du désaccord entre les mesures expérimentales et les prédictions théoriques observée dans le cas du carbopol, au cours de la partie 5.4.3, nous avons représenté l'ensemble des essais en terme $\Delta H = H_{exp.} - H_{theor.}$. Il s'agit de la différence entre la mesure expérimentale de hauteur normale $H_{exp.}$ et la hauteur théorique $H_{theor.}$ correspondant à la même vitesse pour une pente donnée. Cela consiste à résoudre l'équation 5.1 avec une inconnue $H_{theor.}$, en considérant les paramètres d'ajustement, après essai sur le canal, des rhéogrammes moyens (voir en annexe C), pour chaque niveau de vitesse. Les données obtenues avec les enveloppes qui encadrent le domaine d'incertitude (voir en annexe C) sont représentées sous forme de barres d'erreurs de part et d'autre du point de donnée.

La figure 5.26 montre que la différence de hauteur est indépendante de la hauteur mesurée H_N et de la vitesse du tapis u_b , et semble ne dépendre que du fluide. Plus généralement, ce désaccord ne semble pas dépendre des grandeurs normalisées qui caractérisent chaque matériau en écoulement (voir les figures 5.26, 5.27 et 5.28).

En fin de compte, le désaccord résiduel qui existe parfois entre les mesures expérimentales et les prédictions théoriques du modèle est certainement dû à deux éléments. D'une part, on sous-estime encore l'incertitude sur les paramètres rhéologiques. D'autre par, la présence de bulles (voir la figure 5.31) peut faire baisser un peu la masse volumique du fluide.

Finalement, on peut trouver pour chaque expérience un jeu de paramètres τ_c/ρ et k/ρ qui ajustent bien les données, soit sur leur totalité ou sur le début ou la fin (voir la figure 5.32).

Cela consiste à opérer un *calage* pour ajuster la courbe théorique sur les mesures expérimentales.

En pratique, il s'agit de résoudre l'équation 5.1 du modèle théorique pour trouver la valeur de la contrainte seuil de calage $\tau_{c,calage}$. On trouve une solution unique pour toute série de mesures expérimentales (u_b, H_N) obtenues avec une pente de canal θ , pour tout matériau de masse volumique ρ et de paramètres rhéologiques : τ_c , k et n . Rappelons que le rapport k/τ_c et l'indice n sont constants pour un même matériau et pour les mesures avant et après essai sur le canal (voir la partie 3.3.4). Ainsi, on peut obtenir le profil théorique vitesse–hauteur qui ajuste nos données expérimentales, en utilisant les paramètres rhéologiques de calage : $\tau_{c,calage}$, $k_{calage} = C \cdot \tau_{c,calage}$ où $C = k/\tau_c$, et $n_{calage} = n$.

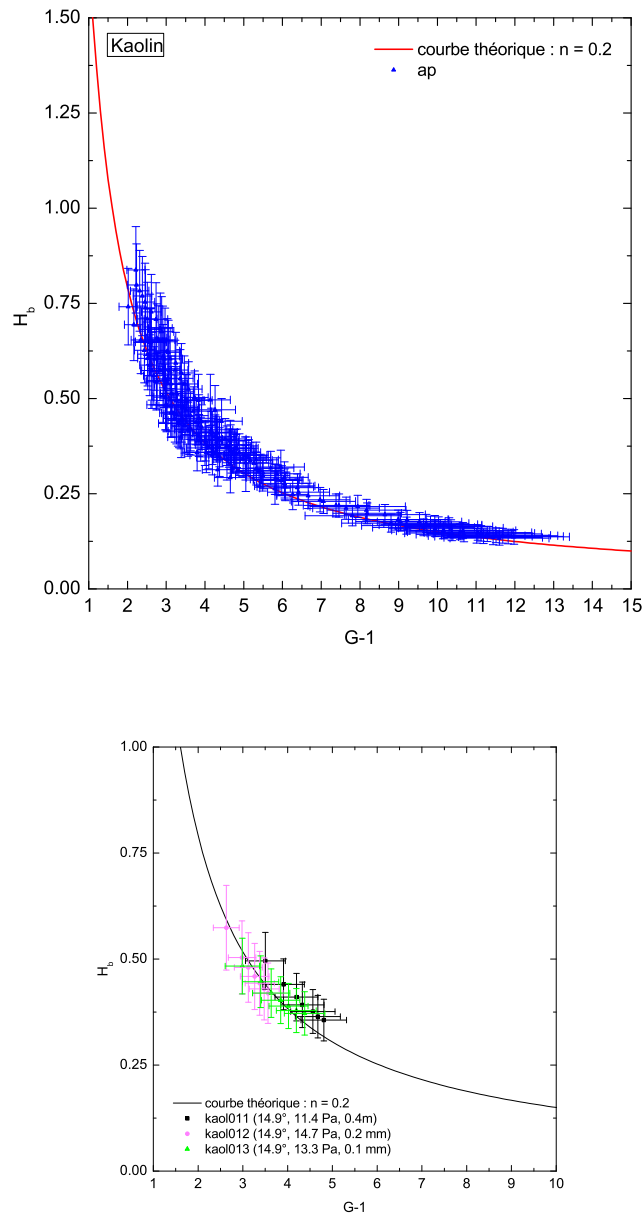
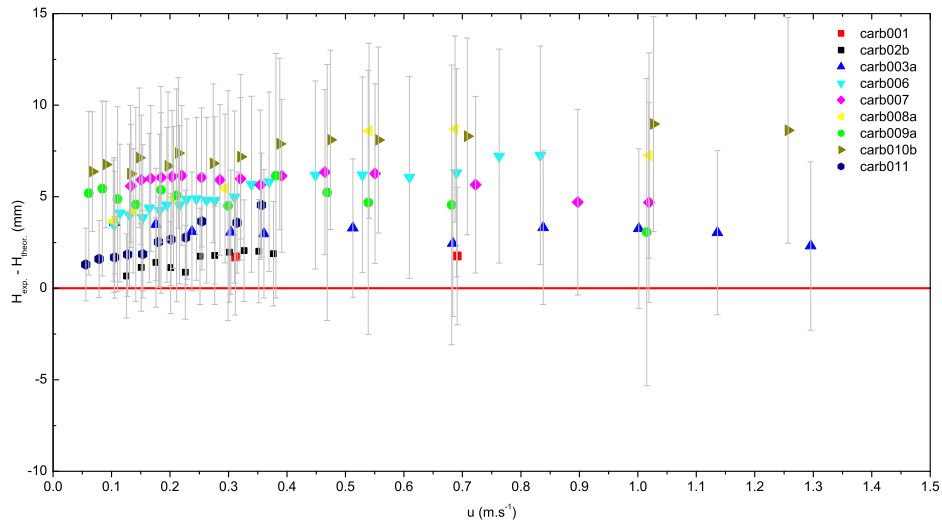
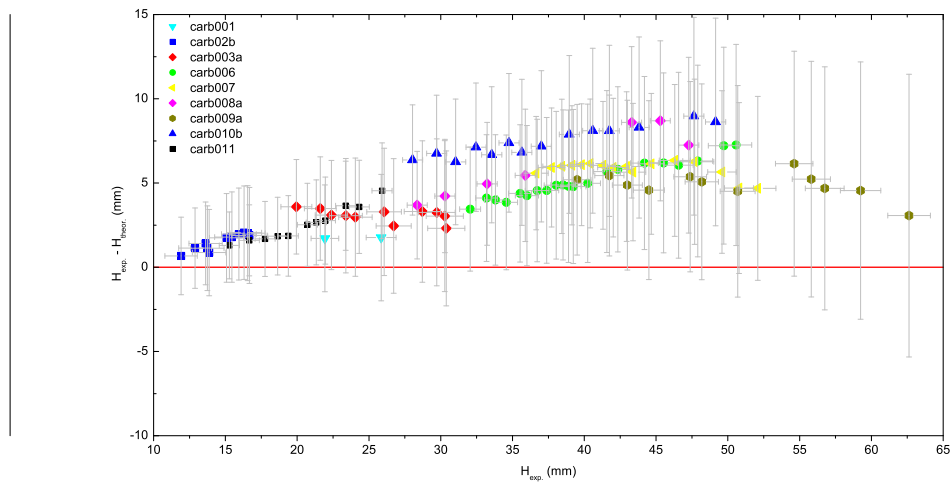
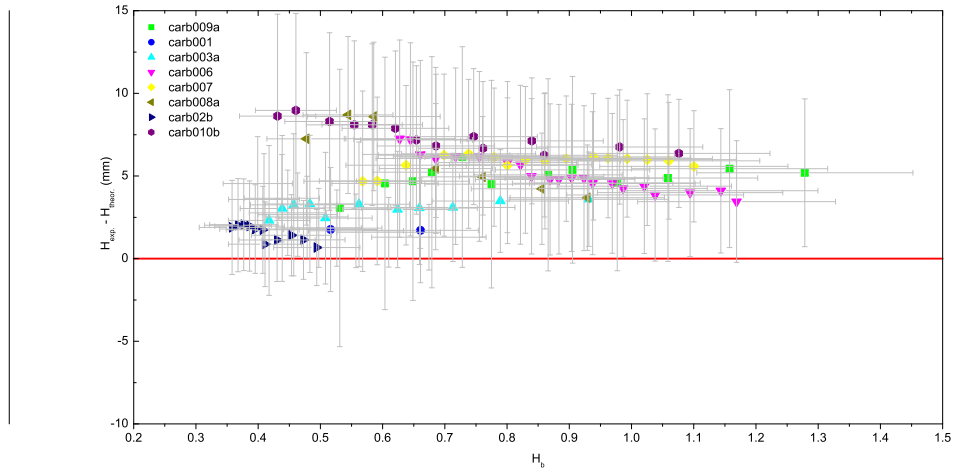
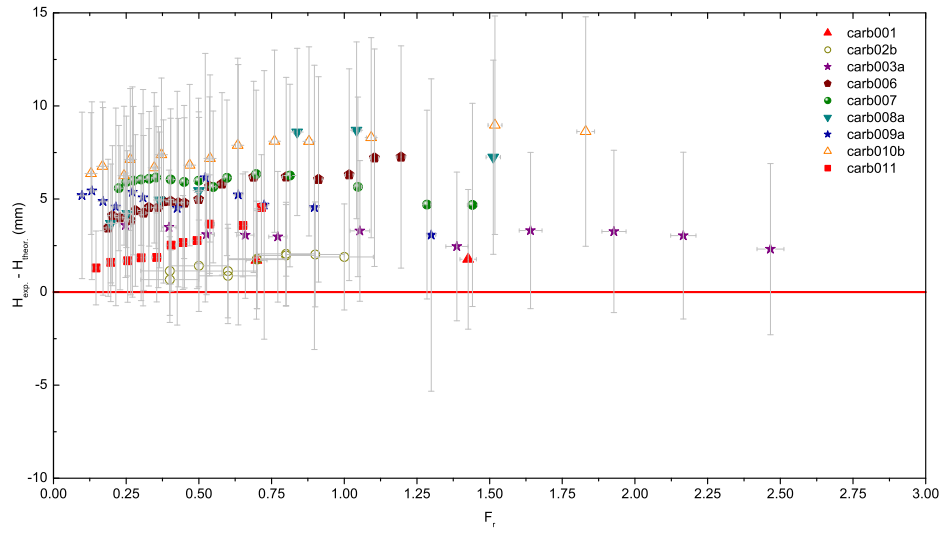
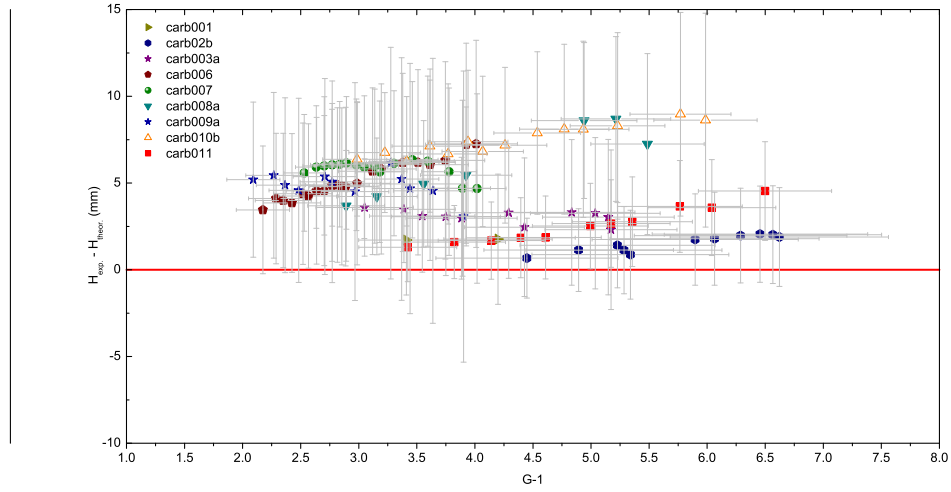
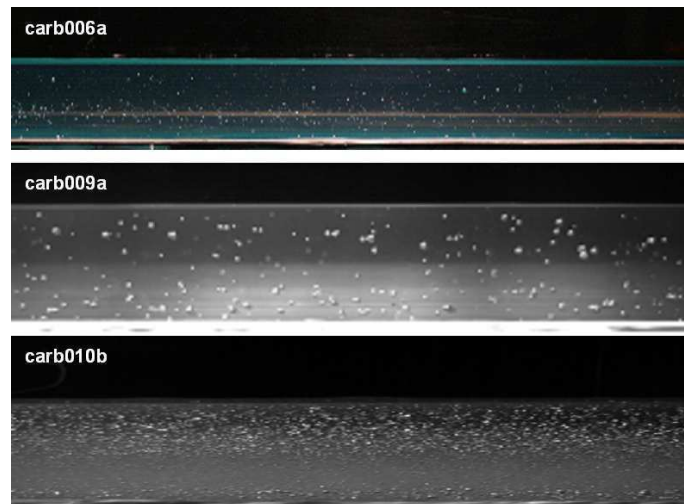


FIGURE 5.25 – Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points avec des barres d'erreurs. La courbe théorique est la courbe pleine. Nous distinguons sur la figure du bas, les essais réalisés avec des largeurs différentes ($kaol011$, $kaol012$ et $kaol013$). Tous les points ont été obtenus avec des mesures de rhéométrie sur des échantillons prélevés après essai sur le canal (ap).

FIGURE 5.26 – Évolution de ΔH en fonction de la vitesse du tapis u_b .FIGURE 5.27 – Évolution de ΔH en fonction de la hauteur expérimentale de l'écoulement H_N .

FIGURE 5.28 – Évolution de ΔH en fonction du nombre adimensionnel H_b .FIGURE 5.29 – Évolution de ΔH en fonction du nombre adimensionnel F_r .

FIGURE 5.30 – Évolution de ΔH en fonction du nombre adimensionnel G .FIGURE 5.31 – Images d'acquisition du *carb006a*, *carb009a* et *carb010b*.

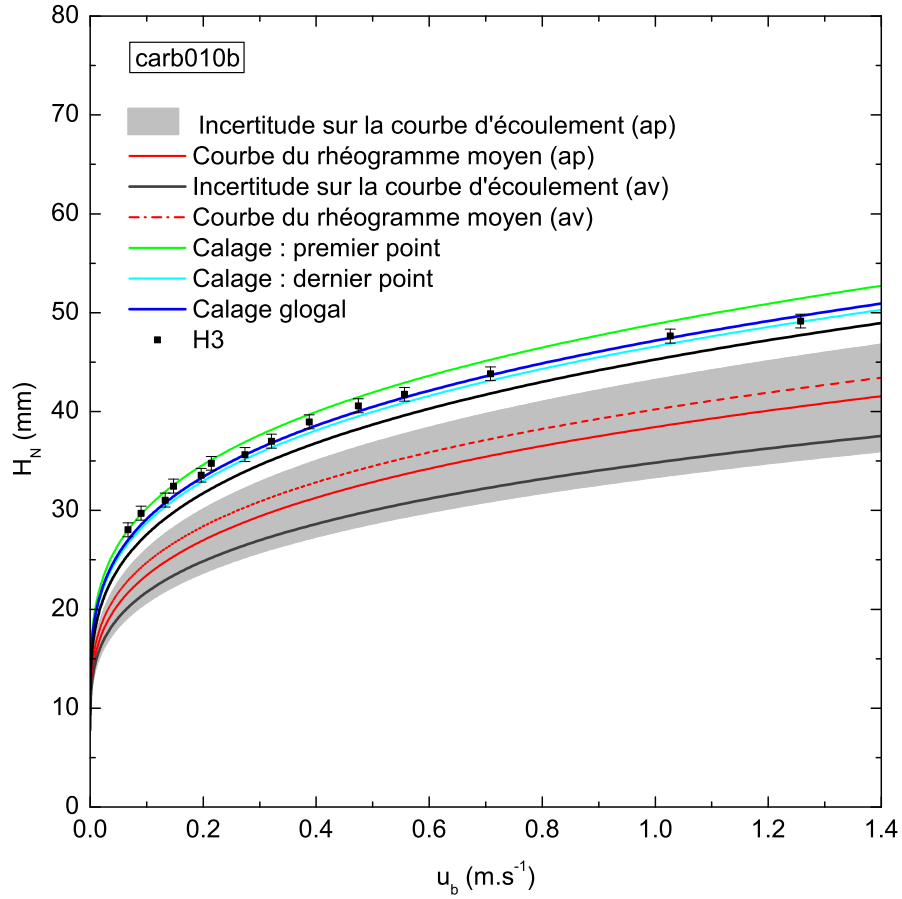


FIGURE 5.32 – Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau *carb010b* : illustration du calage des données pour les propriétés rhéologiques avant et après essai sur le canal. Pour un rapport $k/\tau_c = 0.7$, un indice d'écoulement $n = 0.383$ et une masse volumique du fluide $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$, les paramètres d'ajustement τ_c et k sont : pour le premier point qui correspond à la vitesse la plus faible la série de données ($\tau_c = 19.74 \text{ Pa}$, $k = 13.13 \text{ Pa.s}^n$), pour le dernier point qui correspond à la vitesse plus élevée de la série ($\tau_c = 18.57 \text{ Pa}$, $k = 12.35 \text{ Pa.s}^n$), enfin l'ajustement global sur toute la série de données donne ($\tau_c = 18.87 \text{ Pa}$, $k = 12.55 \text{ Pa.s}^n$). Les paramètres d'ajustement obtenus avec les mesures avant et après essai sont en annexe C.

Chapitre 6

Étude des mélanges

6.1 Préambule

Le matériau constitutif des laves torrentielles, composé d'eau et de particules de toutes tailles, est modélisé ici comme un mélange de particules non-colloïdales dans un fluide à seuil. On considère donc qu'il existe une coupure granulométrique, de l'ordre de $40\ \mu\text{m}$ typiquement, séparant les particules fines, responsables de la rhéologie complexe de la matrice, des particules grossières dont on veut ici comprendre la dynamique. Dans une lave torrentielle, ces particules couvrent une large gamme granulométrique de $10^{-4}\ \text{m}$ à $10\ \text{m}$ et prennent diverses formes avec des masses volumiques allant de $2500\ \text{kg.m}^{-3}$ à $3000\ \text{kg.m}^{-3}$.

Nous avons conduit des expériences avec des particules rigides de forme sphérique incorporées une à une dans des coulées stationnaires de carbopol sur le canal expérimental. Pour choisir les dimensions et les masses volumiques de ces particules nous nous sommes référés aux grandeurs typiques observées pour les laves torrentielles naturelles et aux lois d'échelles qui gouvernent leur écoulement (voir la partie 1.2.2). Nous avons choisi pour nos expériences des billes de précision de différentes masses volumiques (en polyacétal à $1410\ \text{kg.m}^{-3}$, en polyamide à $1140\ \text{kg.m}^{-3}$ et en polypropylène à $900\ \text{kg.m}^{-3}$) avec un rapport de masse volumique du solide sur le fluide ρ_p/ρ_f variant dans la gamme 0.9-1.4. Nous avons aussi choisi trois différents diamètres (2 mm, 4 mm et 8 mm) avec un rapport de taille de la particule sur la hauteur de l'écoulement δ/H dans la plage 0.04 à 0.8.

6.2 Cas d'une particule isolée dans du carbopol

6.2.1 Principe des essais

Le principe des essais consiste à observer la dynamique d'une particule isolée dans une coulée stationnaire de carbopol sur le canal expérimental. L'objectif est de déterminer les paramètres cinématiques de cette particule (trajectoire, vitesse de translation et de rotation) dans la zone d'épaisseur constante. Ensuite, nous comparons ces résultats expérimentaux à des prédictions théoriques. La géométrie du canal est réglée finement sur une pente θ donnée et une largeur fixée. Une caméra est placée face à la rive du canal avec une distance de recul qui permet de couvrir le champ d'acquisition souhaité. La particule est incorporée à l'amont

de la coulée. Plus précisément, la particule est libérée au plus près de la demi épaisseur de la coulée, au centre de l'espacement entre les deux rives (voir la figure 6.1). Nous enregistrons de façon simultanée des séquences d'images du passage de la particule dans le champ d'acquisition, ainsi que la vitesse de défilement du tapis.

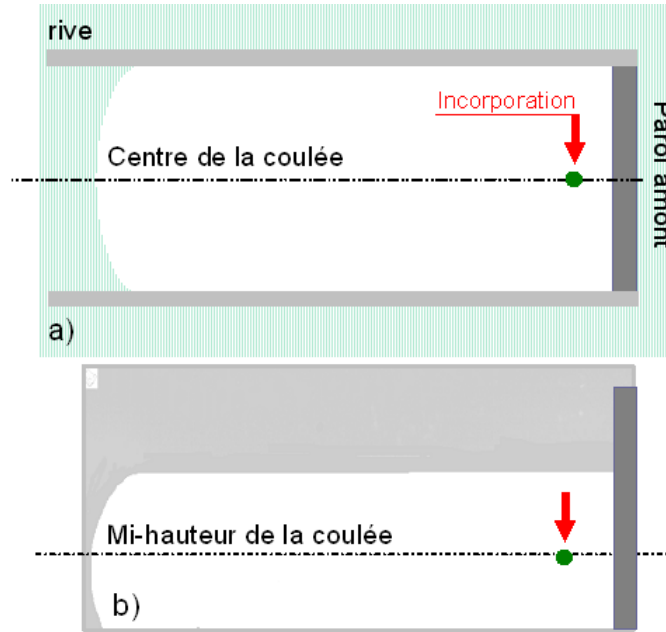


FIGURE 6.1 – a) Vue de haut de l'incorporation de la particule au centre de la coulée. b) Vue de face 'simultanée' de la particule introduite à mi-hauteur.

6.2.2 Description des essais

Paramètres des essais

Nous avons mis en œuvre quatre solutions de carbopol de masse volumique ρ , caractérisées par les paramètres d'ajustement de leurs rhéogrammes moyens respectifs (voir tableau 6.1). Les essais de rhéométrie ont été conduits sur des échantillons prélevés à la fin des expériences sur le canal. Tous ont été mis en place avec une largeur de canal fixée de 0.1 m et une longueur de coulée de 1 m, pour une pente donnée θ . On précise pour chaque série d'expériences, le diamètre δ et la masse volumique ρ_p de la particule. Les tableaux en annexe G présentent un récapitulatif des paramètres de ces essais. Chaque ligne du tableau correspond à une *acquisition* d'images du passage d'une particule¹. Pour chaque essai, nous mesurons la vitesse du tapis u_b ainsi que la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme H_N . Nous avons obtenu des mesures de hauteur H_N dans la plage [8.2;51.6] mm, dans la gamme des faibles vitesses du tapis [0.04;0.20] m.s⁻¹.

1. Nomenclature : les lettres représentent la série d'essais pour chaque matériau (carbopol A, B, D, E). Les chiffres désignent les différents essais.

matériau	largeur (m)	pente θ (°)	ρ (kg.m ⁻³)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ^{n})	n
<i>carbopol A</i>	0.1	6.7	996	12.45	7.66	0.403
<i>carbopol B</i>	0.1	6.7	997	11.19	7.18	0.405
<i>carbopol D</i>	0.1	14.5	997	9.33	7.24	0.418
<i>carbopol E</i>	0.1	14.5	996	2.40	2.92	0.442

TABLE 6.1 – Tableau récapitulatif des essais conduits : nom du carbopol, pente du canal θ , masse volumique ρ du carbopol et paramètres d'ajustement du rhéogramme moyen pour chaque essai (τ_c , k et n).

Courbes vitesse–hauteur

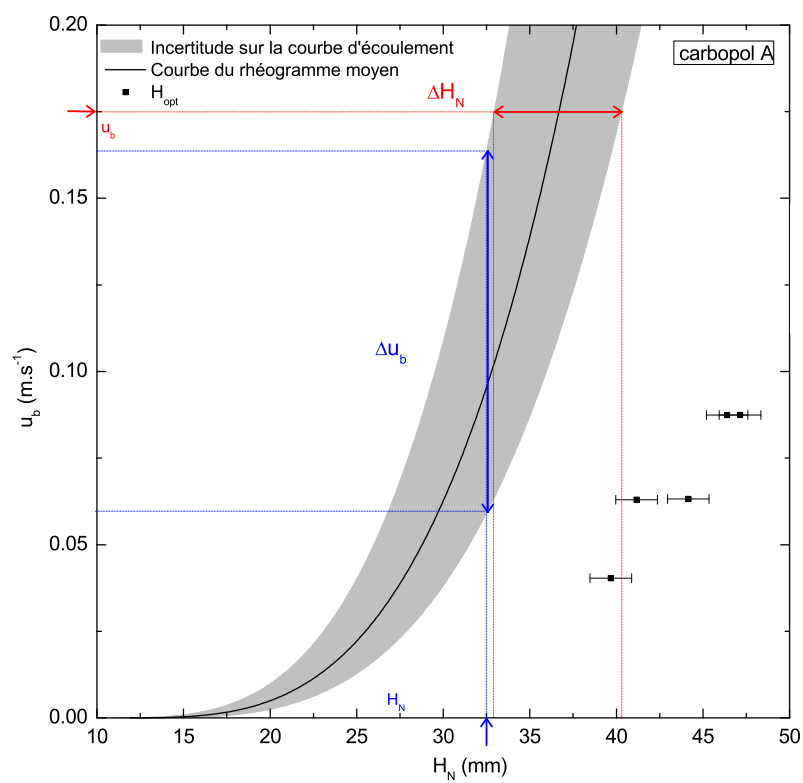
Comme nous nous intéressons plus particulièrement aux vitesses dans ce chapitre (vitesses des particules, en particulier), nous choisissons de représenter les mesures sous la forme de vitesse en fonction de la hauteur d'écoulement (voir les figures 6.2, 6.3, 6.4 et 6.5). Comme nous l'avions relevé dans la partie 5.3.1, cette représentation illustre bien combien le niveau d'incertitude sur la vitesse, associée à l'incertitude sur les paramètres rhéologiques, est nettement plus important que celui observé sur la hauteur (voir la figure 6.2). Signalons par ailleurs que nous représentons ces figures avec des échelles différentes sur la hauteur car nous avons mesuré des hauteurs différentes dans la même gamme de vitesse.

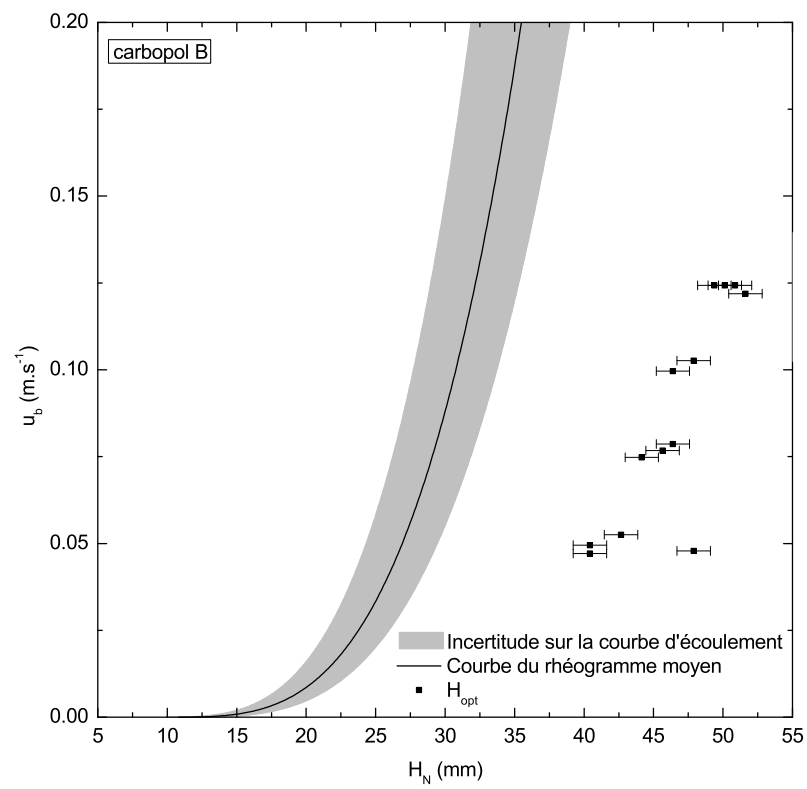
Les courbes vitesse–hauteur illustrées sur les figures 6.2, 6.3, 6.4 et 6.5 sont obtenues avec les paramètres d'ajustement des rhéogrammes moyens pour chaque matériau. Elles montrent un bon accord entre les points de données expérimentales et les prédictions théoriques pour les matériaux *carbopol D* et *carbopol E* et un désaccord important pour les matériaux *carbopol A* et *carbopol B* (voir la figure 6.6). Les expériences réalisées au cours de ce chapitre sont encore plus longues que dans le chapitre 5, par conséquent elles sont encore plus sensibles à l'évolution des paramètres rhéologiques du matériau.

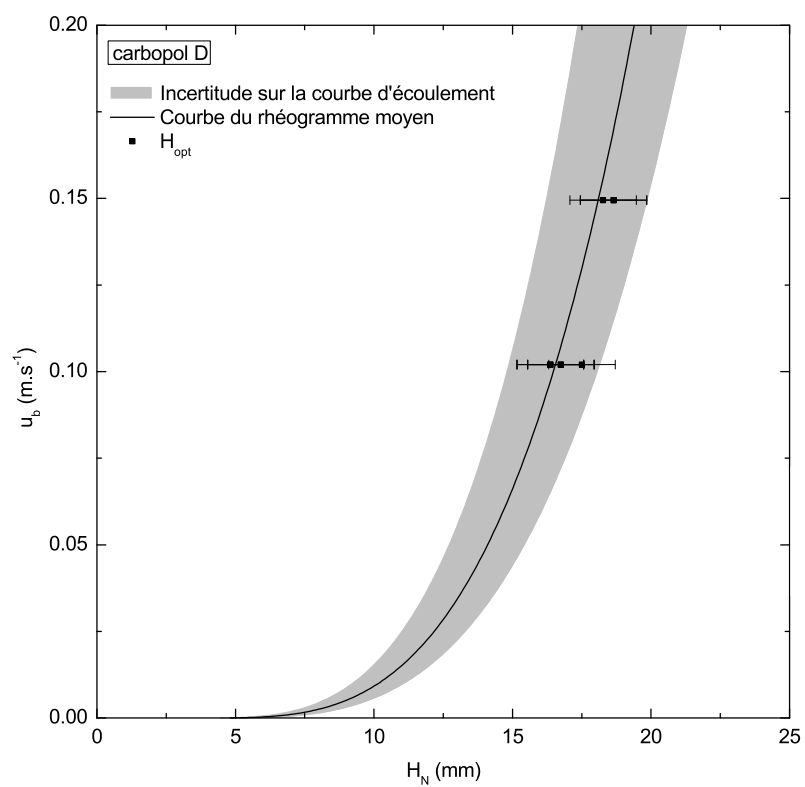
Comme nous ne connaissons pas les paramètres rhéologiques du matériau pour chaque essai, nous choisissons de corriger ce désaccord. Pour ce faire nous utiliserons dans ce qui suit les paramètres d'ajustement de *calage* décrits dans la partie 5.5.1. Rappelons qu'ils sont calculés à partir de l'expression 5.2 pour une hauteur expérimentale donnée H_N , avec ρ , k/τ_c et n constants pour chaque série d'essai réalisée avec le même matériau. L'ensemble de ces paramètres est présenté pour chaque essai dans l'annexe G.

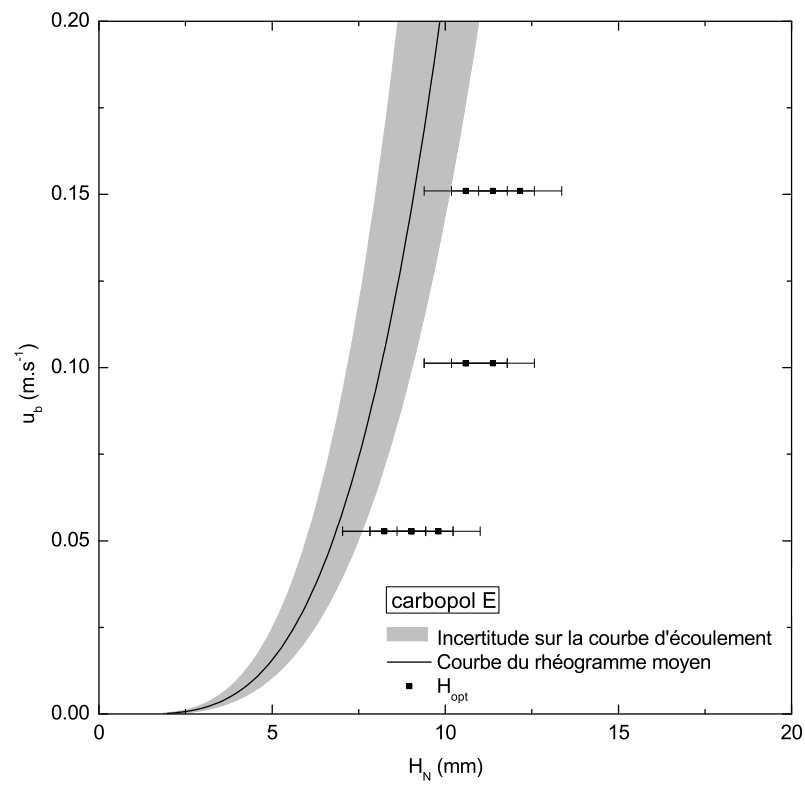
Normalisation : cas du fluide seul

Le bilan adimensionnel de nos expériences est décrit avec les trois nombres suivants (voir la partie 5.4) : le nombre de Froude F_r , le nombre de Herschel-Bulkley H_b et le nombre G . Les données vitesse - hauteur normalisées sous la forme H_b en fonction de G (voir l'expression 5.6), pour toutes nos expériences avec des particules, sont rassemblées sur la figure 6.7. Nous observons en particulier que l'utilisation des paramètres de calage nous a permis de corriger le désaccord entre les mesures et la théorie. La figure 6.8 illustre les valeurs de Froude obtenues pour nos expériences.

FIGURE 6.2 – Courbe vitesse–hauteur pour le matériau *carbopol A*.

FIGURE 6.3 – Courbe vitesse–hauteur pour le matériau *carbopol B*.

FIGURE 6.4 – Courbe vitesse–hauteur pour le matériau *carbopol D*.

FIGURE 6.5 – Courbe vitesse–hauteur pour le matériau *carbopol E*.

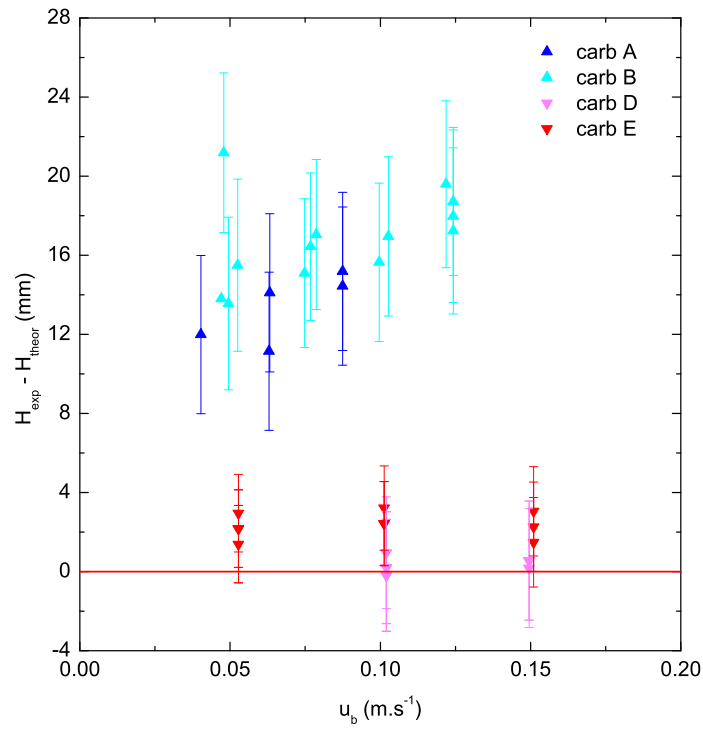


FIGURE 6.6 – Différence entre hauteur expérimentale mesurée ($H_{exp} = H_N$) et hauteur théorique H_{theor} obtenue avec les paramètres d'ajustement du rhéogramme moyen, pour une vitesse donnée u_b .

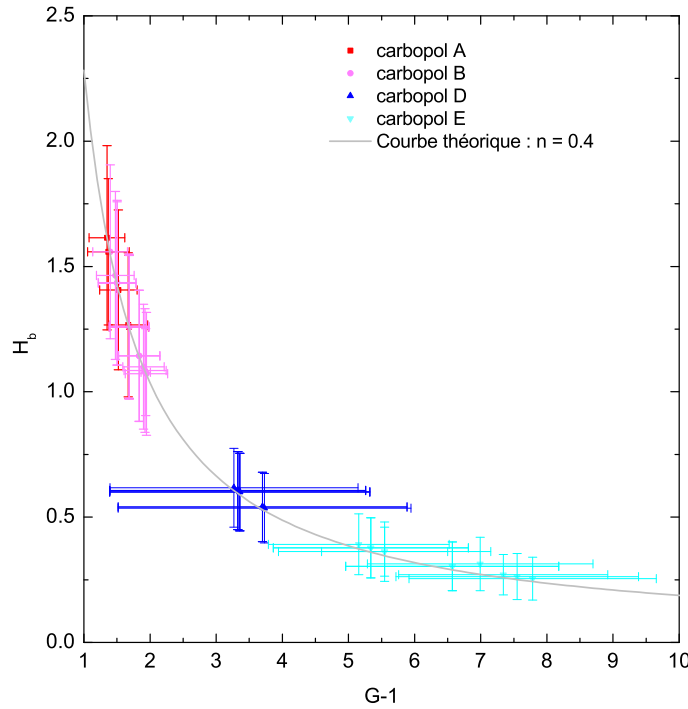


FIGURE 6.7 – Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel $G - 1$. Les données expérimentales sont représentées par des points. Les nombres H_b et G sont calculés avec les paramètres rhéologiques de calage (voir l'annexe G) et les mesures expérimentales H_N et u_b . La courbe pleine est la courbe théorique.

6.2.3 Détermination des trajectoires des particules

Paramètres d'acquisition :

Nous avons utilisé une caméra numérique rapide de type IDT X-STREAM XS-3. Cette caméra équipée d'un capteur CMOS et possédant une mémoire vive de 1 GB peut enregistrer des images avec une résolution maximale égale à 1280 pixels $\times$ 1024 pixels à une fréquence maximale égale à 614 Hz. Les images sont visualisées en temps réel sur un ordinateur dédié via une interface USB.

La caméra est placée sur un trépied stable muni de rotules à une distance de l'ordre d'un mètre de la face de la rive extérieure. L'orthogonalité de la caméra est réglée à l'aide d'une mire 3D placée sur le tapis, contre la rive (figure 6.9-a).

Le laboratoire où se trouve le canal est plongé dans une semi-obscurité. La zone d'acquisition a été éclairée artificiellement par une rangée de lampes halogènes, placée au-dessus de

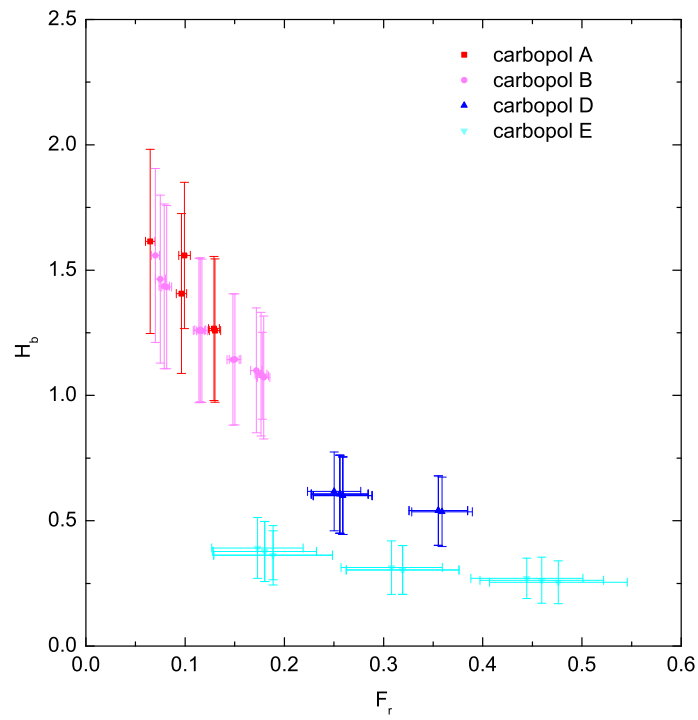


FIGURE 6.8 – Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel F_r pour les données expérimentales H_N et u_b . Le nombre H_b est calculé avec les paramètres rhéologiques de calage (voir l'annexe G).

l'écoulement, la lumière naturelle produisant trop de reflets sur les rives et sur le fond du canal. Le temps d'exposition a été ajusté pour chaque essai en fonction des conditions réelles d'éclairage. Nous avons choisi un arrière plan blanc uniforme pour améliorer le contraste du fond.

La caméra est régulièrement calibrée. Les ordres de grandeur des coefficients de distorsion étant faibles, nous avons considéré que la distorsion était négligeable et n'avons apporté aucune correction aux images.

La figure 6.9-a représente le damier utilisé pour régler la netteté, l'orientation de la caméra, le champ de vision et pour déterminer le facteur de conversion des images pour chaque série d'essais. Ce damier² est composé de carrés alternés noirs et blancs, de 25.5 mm de côté. La face du damier est parallèle aux rives, sa base est posée sur le tapis immobile.

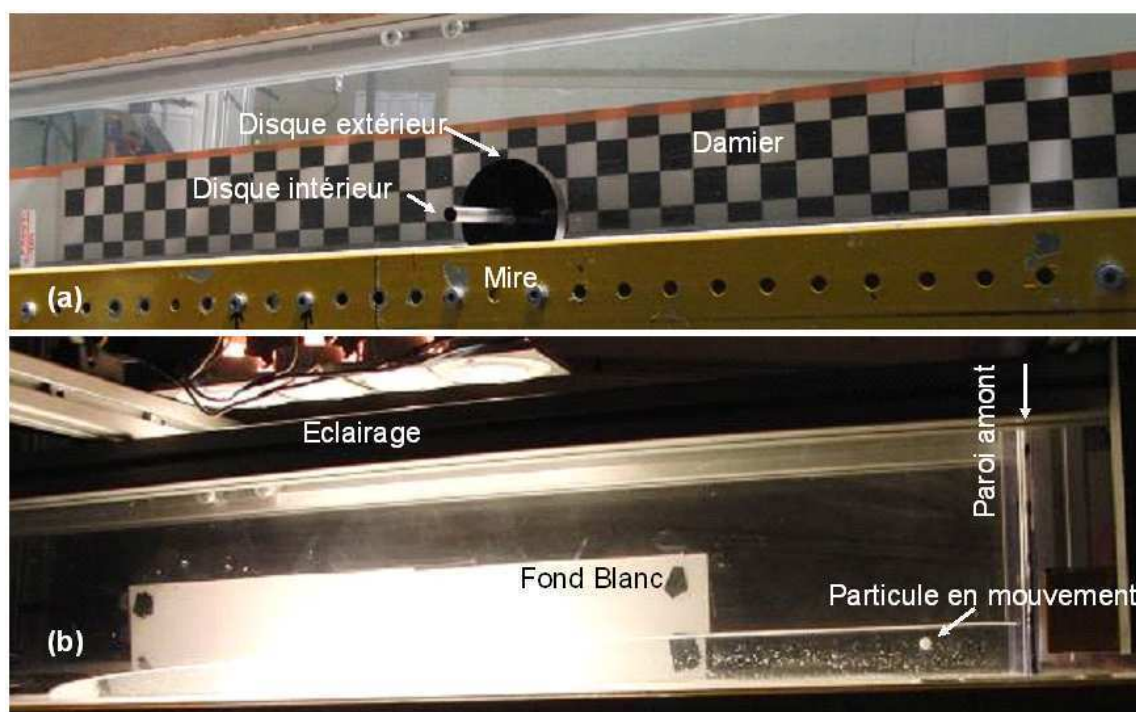


FIGURE 6.9 – (a) vue de face de la mire 3D et du damier de référence disposés sur le canal (b) vue de face globale d'une coulée de carbopol dans laquelle évolue une particule de couleur blanche. Le champ d'acquisition correspond à la zone la plus intensément éclairée. Un fond blanc est placé derrière la rive opposée.

Le réglage de la caméra ne doit pas dépendre de la distance caméra-damier. Comme la particule évolue au centre de la coulée, le réglage se fait sur deux positions précises autour de la mi-largeur du canal. Cela permet de couvrir la zone de passage d'une particule autour de cette position selon le schéma de la figure 6.10.

2. 1 m de long, 9 cm de haut et une base de 1.6 cm d'épaisseur

Matériau	C (mm/pixel)	L (pixel) $\times$ H(pixel)	L (mm) $\times$ H(mm)
<i>carbopol A</i>	0.75	1280 $\times$ 136	955 $\times$ 102
<i>carbopol B</i>	0.75	1276 $\times$ 136	952 $\times$ 102
<i>carbopol D</i>	0.38	1280 $\times$ 220	487 $\times$ 84
<i>carbopol E</i>	0.78	1136 $\times$ 112	891 $\times$ 88

TABLE 6.2 – Tableau récapitulatif des dimensions du champ de vision et du coefficient de conversion correspondant C : L est la longueur du champ et H est la hauteur du champ.

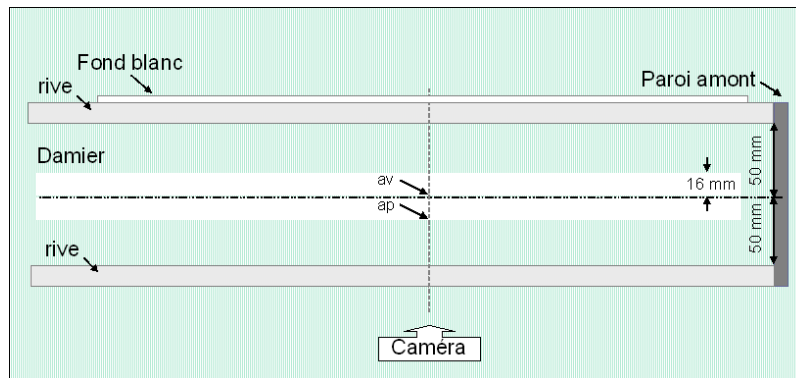


FIGURE 6.10 – Vue de haut du positionnement du damier : (av) positionné avant le plan central du canal (ap) après le plan central.

Les paramètres de réglage de la caméra sont les suivants : résolution spatiale égale à 1280 pixels $\times$ 136 à 220 pixels, fréquence de prises de vue égale à 10 Hz, dynamique égale à 8 bits. Le début et la fin de chaque acquisition de séquence d'images ont été déclenchés manuellement par l'opérateur.

Le champ de vision de la caméra ainsi que le facteur de conversion des images enregistrées sont indiqués pour chaque série d'essai³, sur le tableau 6.2. Typiquement nous avons observé qu'une particule parcourt la totalité du champ de vision, de l'ordre du mètre, sur une durée d'une minute. En tenant compte de cet ordre de grandeur, du facteur de conversion et des capacités de stockage des données dont nous disposons, nous avons estimé qu'une fréquence d'acquisition de 10 Hz était suffisante pour nos expériences.

Le traitement d'image :

Pour déterminer la position du centre de gravité de la particule sur chaque image nous avons traité les images brutes en deux phases principales. Les algorithmes ont été développés sur *Matlab* et sur *ImageJ*. Lors de la première phase de traitement, on isole la particule de sorte qu'elle soit le seul objet détecté. Le contour de la particule est détecté en utilisant une

3. Une série d'essai avec un matériau donnée

succession d'opérations morphologiques (seuillage, inversion du noir et blanc, érosion, dilatation, ...). Ces algorithmes consistent essentiellement à corriger le fond de l'image brute, à isoler l'objet souhaité en éliminant les singularités (bulles d'air, défauts d'éclairage et objets parasites). À l'issue de la seconde phase de traitement, on trouve le centre de gravité de l'objet sur chaque image et on trace la trajectoire de la particule.

6.3 Résultats :

6.3.1 Trajectoires 2D de la particule

La rotation de la particule

Avant de détecter les coordonnées instantanées de la particule sur sa trajectoire, nous avons voulu vérifier l'apparition d'un éventuel mouvement de rotation. Pour visualiser la rotation en 2 dimensions nous avons marqué des particules⁴ avec des traits de sorte à faire apparaître sur chaque image trois repères géométriques. Il s'agit des deux points d'intersection des traits (point A et point B) et d'un point P remarquable entre ces deux points. Ces points sont positionnés dans un repère orthonormé (CG,x,y,z) dont l'origine est le centre de gravité de la particule (voir la figure 6.11). La trajectoire de la particule est filmée lors de ces essais avec une caméra placée en surplomb de l'écoulement et parallèlement au fond.

La figure 6.12 montre l'addition de deux images obtenues à 1 s d'intervalle sur la trajectoire de la particule incorporée à l'amont et se dirigeant vers le front. Tout d'abord, nous constatons que la particule évolue sur un parcours linéaire et ce sans dévier du centre de la coulée. De plus, les géométries obtenues avec les 3 points de repère montrent que la rotation de la particule -lorsqu'elle apparaît- se manifeste autour d'un seul axe, dans le sens de l'écoulement du fluide. Plus particulièrement, nos mesures montrent que la rotation est quasi-absente lorsque la particule est située dans la zone plug. Au point de changement de direction dans le fluide, le mouvement de rotation devient de plus en plus important jusqu'au fond du canal où elle se retrouve entraînée par le mouvement du tapis vers l'amont. Dans ce qui suit, nous considérons que la rotation reste très limitée dans la zone d'étude choisie.

Coordonnées instantanées de la particule

La particule isolée évolue dans le champ de vitesse de l'écoulement décrit schématiquement sur la figure 6.13. Bien que le mode d'incorporation de la particule soit le même pour tous les essais (voir la figure 6.1), la particule suit globalement deux types de trajectoires : soit elle se retrouve dans la zone du plug et dans ce cas elle y reste et se dirige vers le front. Soit elle se retrouve dans la zone cisaillée et dans ce cas elle chute (voir la partie 6.3.1). Signalons que nous stoppons la détection de la position de la particule lorsqu'elle arrive au niveau de la zone de vitesse nulle (voir la figure 6.13). De plus, retenons que nous avons choisi de réduire notre champ d'étude de la dynamique de la particule à la *zone de hauteur normale*.

4. Particules de 8 mm de diamètre avec des masses volumiques de 900, 1140 et 1410 kg.m⁻³

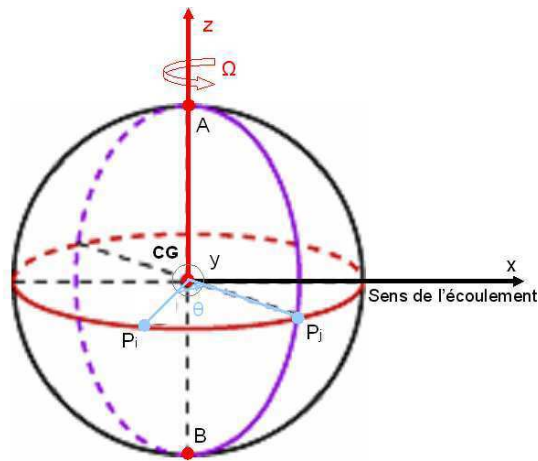


FIGURE 6.11 – Désignation des points de repère sur un schéma d'une particule sphérique : A, B, le centre de gravité CG, le point P (P_i et P_j sont ses positions dans deux images prises à des instants différents sur le parcours de la particule).

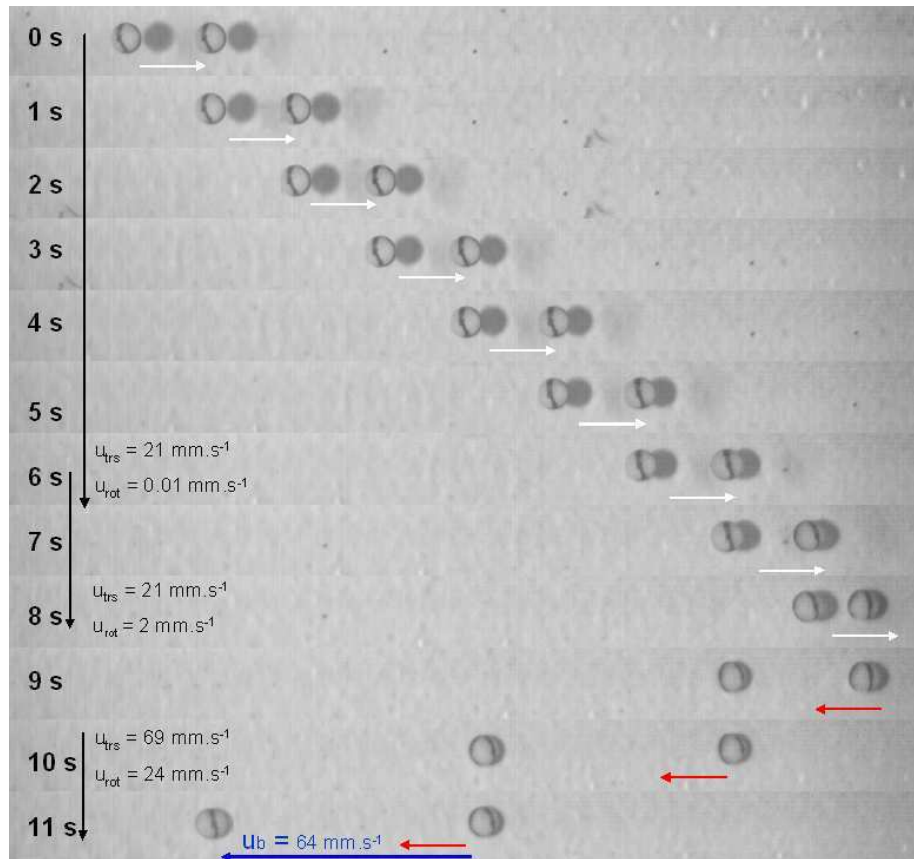


FIGURE 6.12 – Addition de deux images sur des intervalles de 1 s sur la trajectoire d'une particule sphérique (diamètre 8 mm et masse volumique 1410 kg.m^{-3}). u_b est la vitesse de défilement du tapis, u_{rot} est la vitesse de rotation et u_{trs} est la vitesse de translation de la particule.

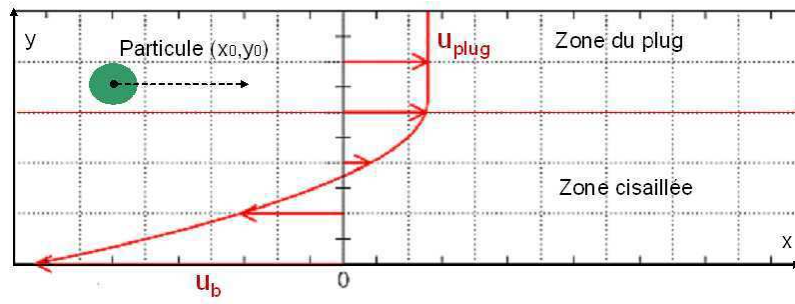


FIGURE 6.13 – Particule dans le champ de vitesse d’une coulée de carbopol sur le canal expérimental.

Les figures 6.14, 6.15, 6.17, 6.16 montrent les coordonnées $2D$ du centre de gravité des différentes particules utilisées pour nos expériences. Ces coordonnées désignent les trajectoires des particules obtenues avec le traitement d’image décrit précédemment.

Sur ces figures les coordonnées de chaque particule en y , sont représentées avec le rapport adimensionné $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de la position en x adimensionnée en terme de $\frac{x}{\delta}$. La position du plug est définie par :

$$h_0 = H_N - \tau_c / \rho g \sin \theta. \quad (6.1)$$

où H_N est la hauteur mesurée dans la zone uniforme, ρ est la masse volumique du fluide.

Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ nous renseigne sur la position relative du centre de gravité de la particule selon qu’elle se trouve dans la zone du plug, dans la partie cisailée ou dans une zone limite entre ces deux zones.

Sur les figures 6.18, 6.19, 6.21, 6.20, les coordonnées adimensionnées $\frac{y-h_0}{\delta}$ du centre de gravité de chaque particule sont représentées pour chaque image en fonction du temps. Ces figures nous indiquent en particulier que toutes les particules qui se trouvent dans la zone cisailée chutent plus ou moins vite selon leur caractéristiques, y compris les particules de masse volumique (900 kg.m^{-3}) inférieure à celle du fluide interstitiel. Les particules qui se trouvent initialement dans le plug y restent même si elles sont animées d’une légère vitesse verticale et chutent dans certains cas où les particules se trouvent dans la zone limite (voir le cas *E16* sur la figure 6.21 et le cas *D2* sur la figure 6.20).

6.3.2 Dynamique de la particule

Vitesse longitudinale

Principe Nous voulons comparer la vitesse longitudinale de la particule u_x dans l’écoulement à la vitesse théorique du fluide u_f . Rapelons que nous mettons en place nos expériences avec des écoulements stationnaires de carbopol. Il s’agit de l’écoulement d’un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent et uniforme sur un plan incliné, de pente θ , muni d’un fond

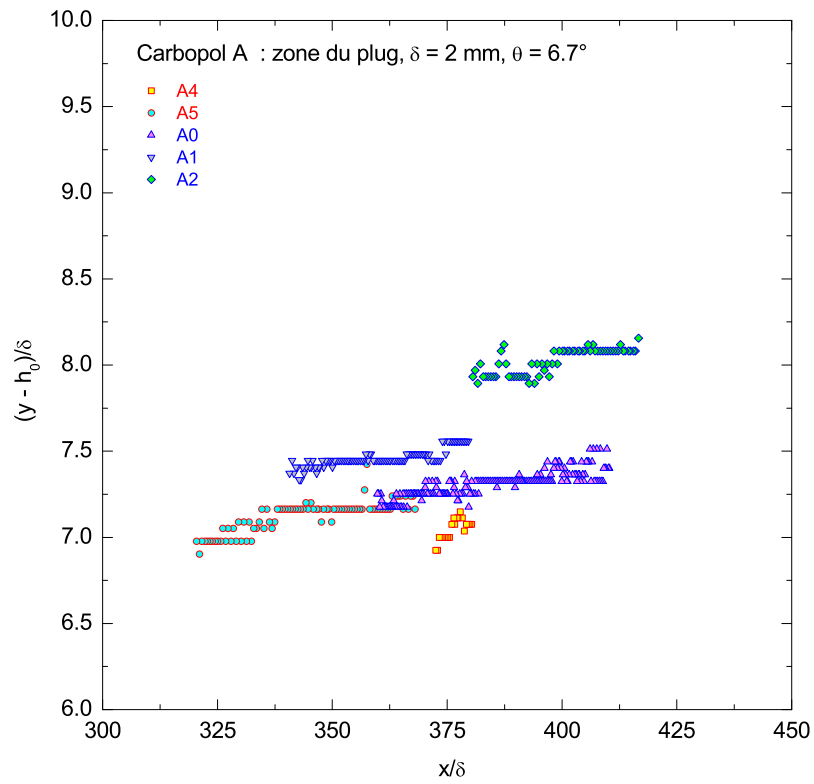


FIGURE 6.14 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* A : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$.

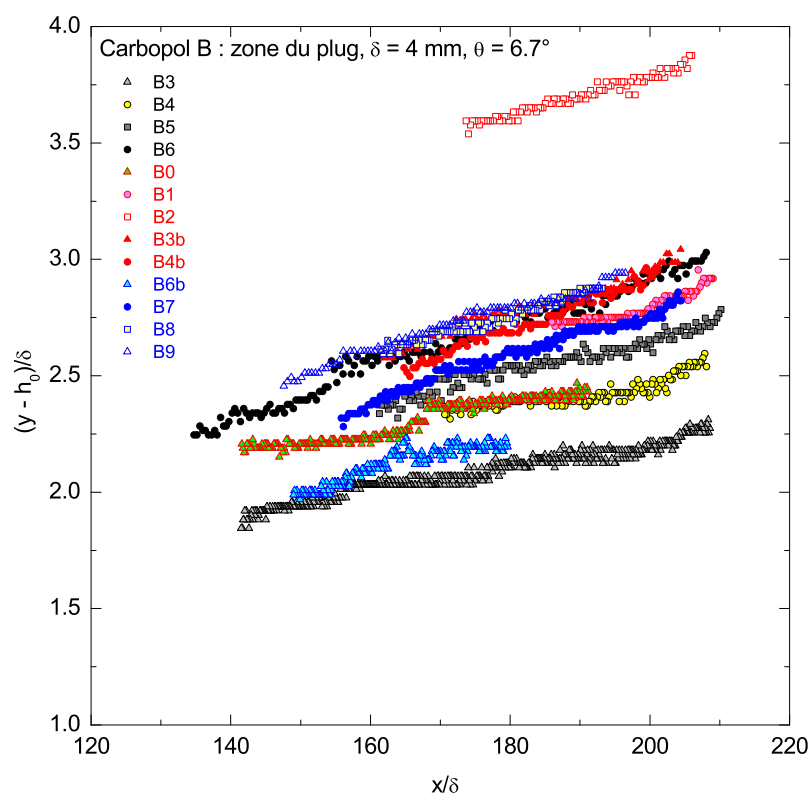


FIGURE 6.15 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* B : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$.

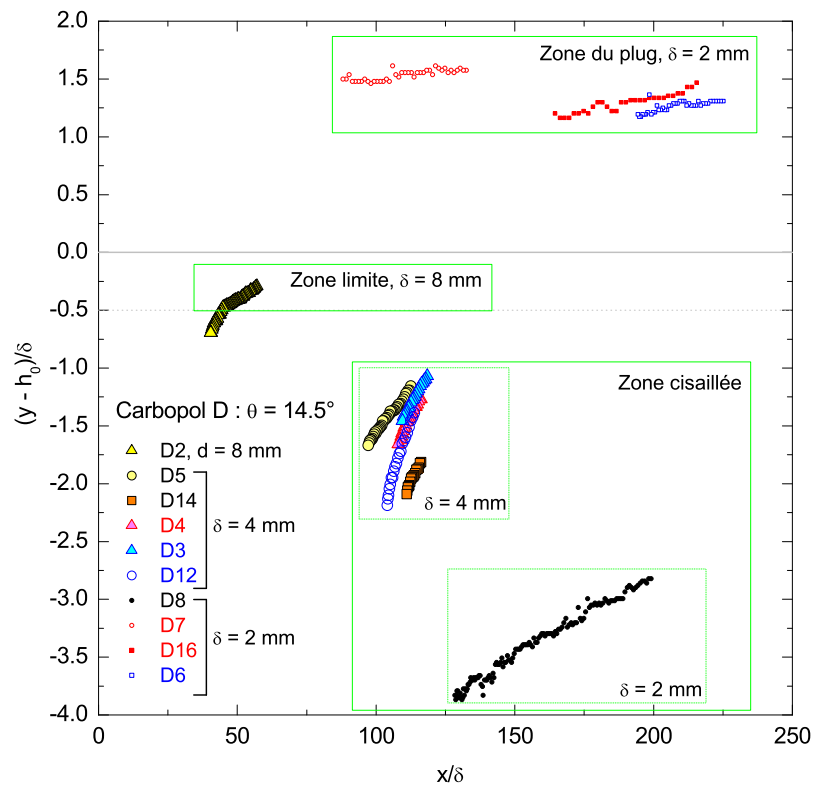


FIGURE 6.16 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* D : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$.

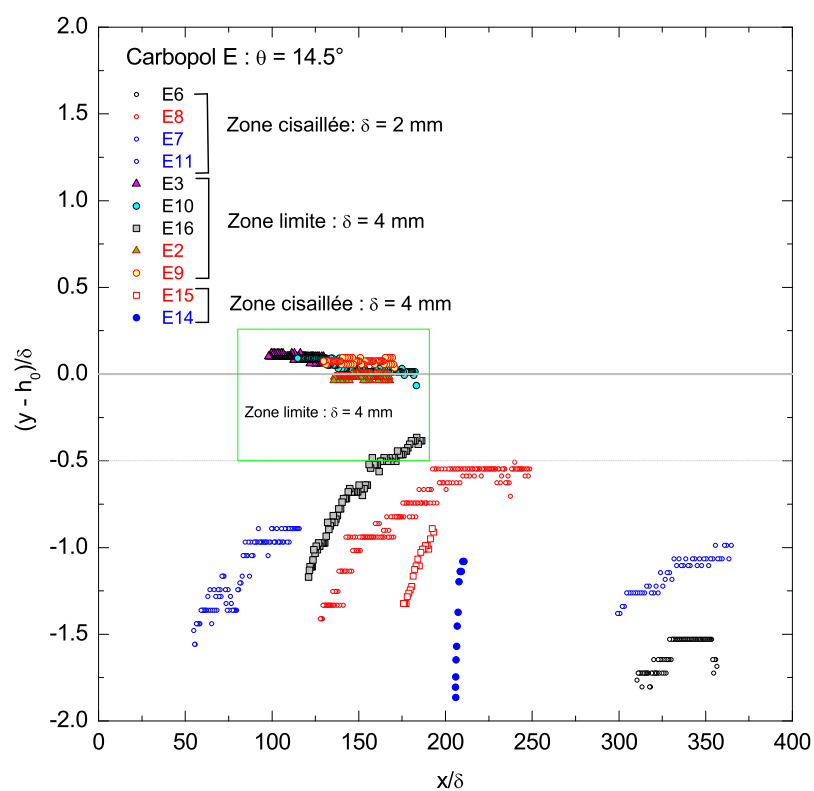


FIGURE 6.17 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* E : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$.

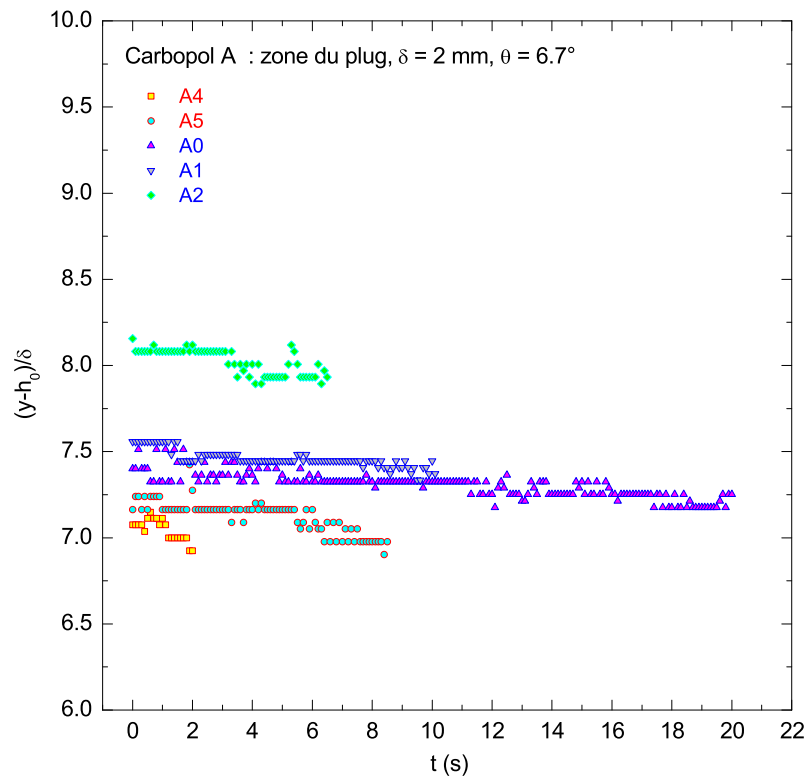


FIGURE 6.18 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* A : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t .

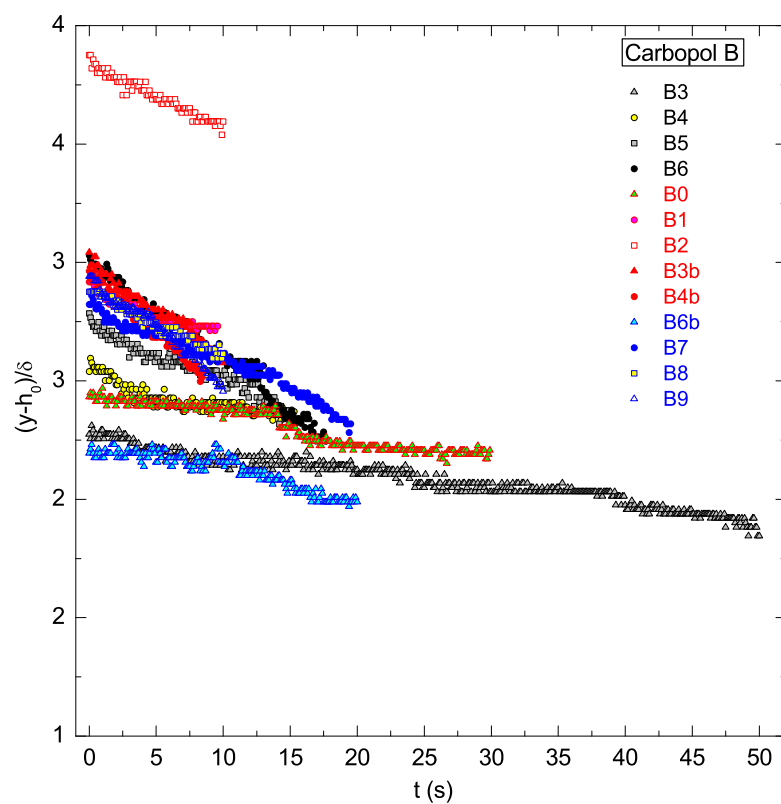


FIGURE 6.19 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol B* Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t .

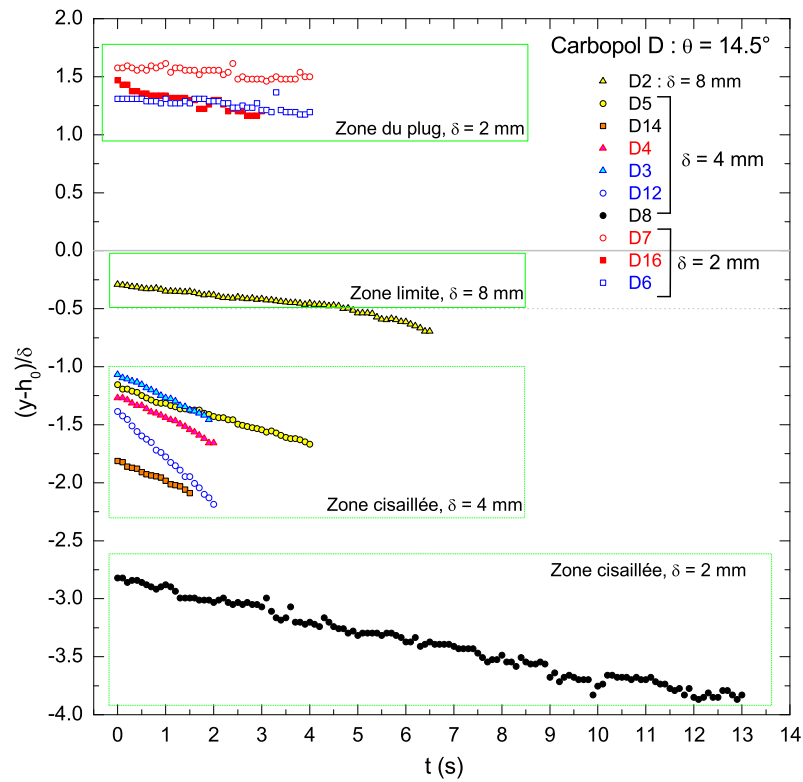


FIGURE 6.20 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* D Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t .

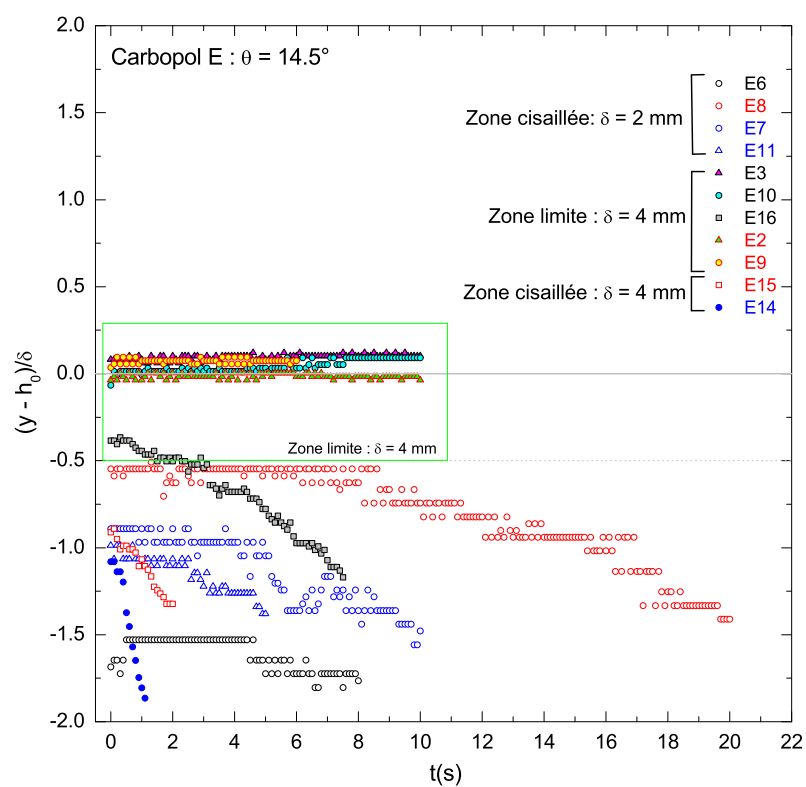


FIGURE 6.21 – Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le *carbopol* E Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t .

mobile (tapis roulant) circulant à l'amont avec une vitesse u_b . La figure 6.13 illustre la forme du profil théorique de la vitesse d'écoulement obtenu avec le dispositif expérimental. La vitesse du fluide $u_f(y)$ à une position donnée dans l'écoulement y est telle que :

$$u_f(y) = u_{thor}(y) - u_b \quad (6.2)$$

Rappelons aussi que l'expression de la vitesse théorique en fonction de la pente du canal θ , à une position y dans l'écoulement telle que (voir la partie 2.2.1) :

$$u_{thor} = \frac{n+1}{n} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h_0^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \left(1 - \frac{y}{h_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \text{ si } y < h_0 \quad (6.3)$$

$$u_{thor} = \frac{n+1}{n} \left(\frac{\rho g \sin \theta}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h_0^{\frac{n+1}{n}} \text{ si } y > h_0 \quad (6.4)$$

avec, k la consistance, τ_c la contrainte seuil et n l'indice d'écoulement et h_0 la position du plug (voir l'expression 6.1).

Application La vitesse longitudinale instantanée de la particule $u_x(t)$ est dérivée de la position du centre de gravité de la particule en x , par rapport au temps. Les trajectoires du centre de gravité des particules pour chaque série d'expériences, sont illustrées dans la partie 6.3.1.

Au lieu de comparer la vitesse de la particule $u_x(t)$ à la vitesse théorique calculée au centre de la particule selon l'équation 6.4, nous avons choisi de la confronter à une vitesse intégrée sur le diamètre de la particule. L'expression de la vitesse du fluide locale $u_{f,\delta}$ en toute position verticale y dans l'écoulement est telle que :

$$u_{f,\delta}(y) = \left[\frac{1}{\delta} \int_{y+\frac{\delta}{2}}^{y-\frac{\delta}{2}} u_{thor.}(\zeta) d\zeta \right] - u_b \quad (6.5)$$

Finalement, la vitesse théorique $u_{f,\delta}$ s'écrit comme suit :

$$u_{f,\delta}(y) = \frac{1}{\delta} \left(\frac{n}{n+1} \frac{\rho g \sin \theta}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h_0^{\frac{n+1}{n}} \left[n h_0 \frac{\left(1 - \frac{\zeta}{h_0} \right)^{\frac{2n+1}{n}}}{2n+1} + \zeta \right]_{y+\frac{\delta}{2}}^{y-\frac{\delta}{2}} - u_b \quad (6.6)$$

avec y la position verticale du centre de gravité de la particule (voir la partie 6.3.1). Les paramètres τ_c , k et n sont les valeurs de calage des paramètres rhéologiques (voir l'annexe G).

L'incertitude sur la vitesse u_x est liée à l'erreur sur la détermination de la position longitudinale de la particule Δx de sorte que $\Delta u_x = \frac{2 * \Delta x}{t_{i+1} - t_i}$. Nous avons estimé que Δx est de l'ordre de la résolution de l'image, c'est-à-dire de l'ordre du pixel. Les coefficients de conversion C pour chaque série d'essai est indiquée sur le tableau 6.2.

L'expression théorique de la vitesse est très sensible aux paramètres rhéologiques et à la hauteur mais dans notre cas, les paramètres sont issues des calages obtenus sur les courbes

vitesse-hauteur. Ils représentent donc le cas idéal dans le cadre de l'expression théorique 6.6. L'incertitude sur cette expression théorique dépend donc des autres paramètres : la position de la particule en y et la vitesse du tapis. L'expression dérivée de 6.6 nous montre que l'incertitude dépend principalement de l'erreur sur la détection de la position de la particule.

Les figures 6.22 et 6.23 illustrent la comparaison entre la vitesse longitudinale instantannée de la particule $u_x(t)$ et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}(y)$, dans la zone cisailée. Dans le cas de la série d'essais avec le *carbopol E*, l'accord est globalement bon pour la majorité des données. Pour le cas du *carbopol D*, il semble que la vitesse de la particule soit systématiquement plus élevée que les prédictions de l'expression théorique 6.6.

Si les barres d'erreur expliquent l'ordre de grandeur de cet écart, elles ne justifient pas son caractère systématique. Néanmoins, nous constatons que l'accord est bon moyennant une correction sur la position de la particule, et ce en calculant la vitesse théorique pour $y + 1 \text{ mm}$. Nous avons opéré cette correction sur toutes les données de la série du *carbopol D* (voir la figure 6.24) et pour les données de l'essai *E14* dans le cas de la série du *carbopol E* (voir la figure 6.25). À l'issue de cette correction, l'accord est sensiblement meilleur pour toutes les expériences, excepté pour le cas *D8* pour lequel le problème est déplacé de l'autre côté de la diagonale.

Vitesse de chute

Principe : Dans cette partie, l'objectif est de confronter la vitesse de chute de la particule à la vitesse de chute théorique d'une particule dans l'hypothèse d'un fluide Newtonien en régime de *Stokes*. Rappelons que l'expression théorique de cette vitesse de chute limite est (voir la partie 2.3.3) :

$$u_s(y) = \frac{2}{9} (\rho_p - \rho) g R^2 \frac{1}{\mu} \cos \theta \quad (6.7)$$

Dans notre cas, on considère pour la viscosité la valeur $\mu(y)$ correspondant à la viscosité dynamique locale du fluide à une position y dans l'écoulement de sorte que :

$$\mu(y) = (\rho g \sin \theta)^{\frac{n-1}{n}} \left(\frac{k}{h_0} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{H_N - y}{\left(1 - \frac{y}{h_0} \right)^{\frac{1}{n}}} ; \text{ si } y < h_0 \quad (6.8)$$

Application : La vitesse de chute instantannée de la particule $u_y(t)$ dérive de la position du centre de gravité en y par rapport au temps. Les trajectoires du centre de gravité des particules pour chaque série d'expériences, sont illustrées dans la partie 6.3.1. Signalons qu'ici nous ne considérons que les vitesses moyennes en y .

Tout comme pour la vitesse du fluide nous avons choisi de calculer la vitesse de chute théorique non au centre de la particule mais plutôt en calculant la viscosité dynamique en intégrant sur le diamètre de la particule, telle que :

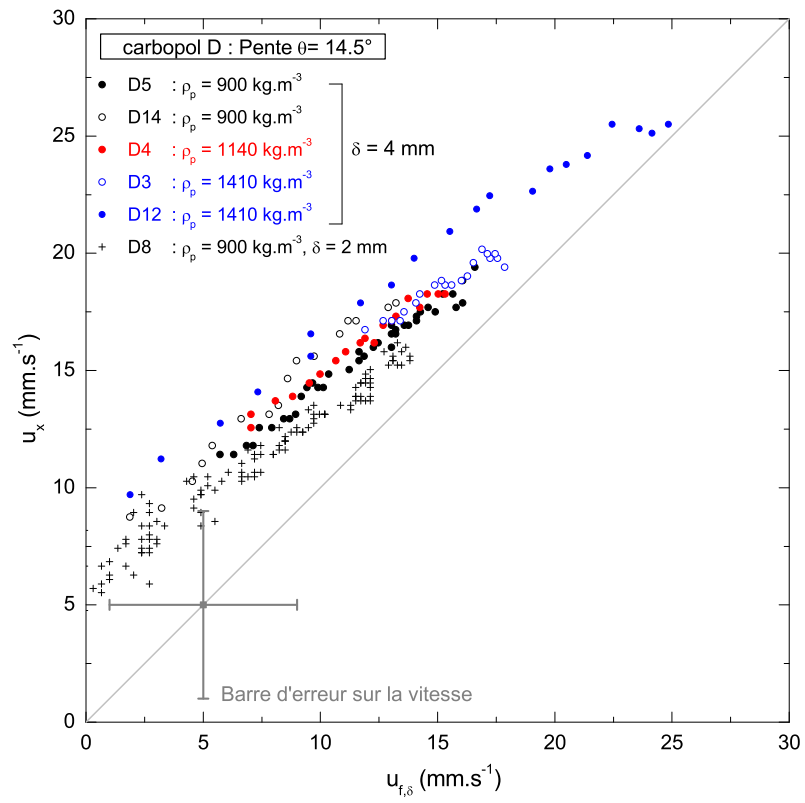


FIGURE 6.22 – Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le *carbopol D*.

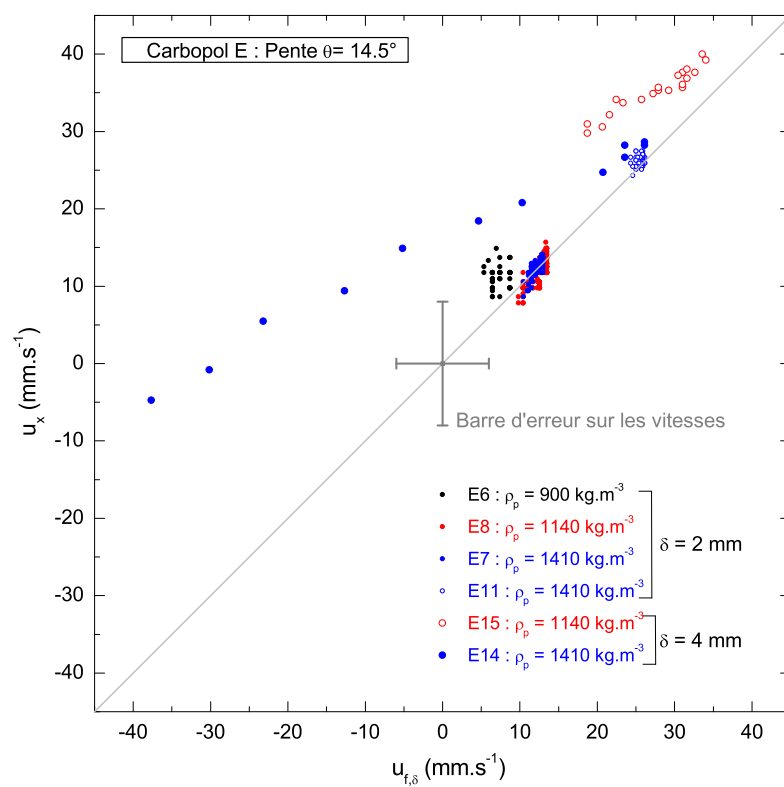


FIGURE 6.23 – Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le *carbopol E*.

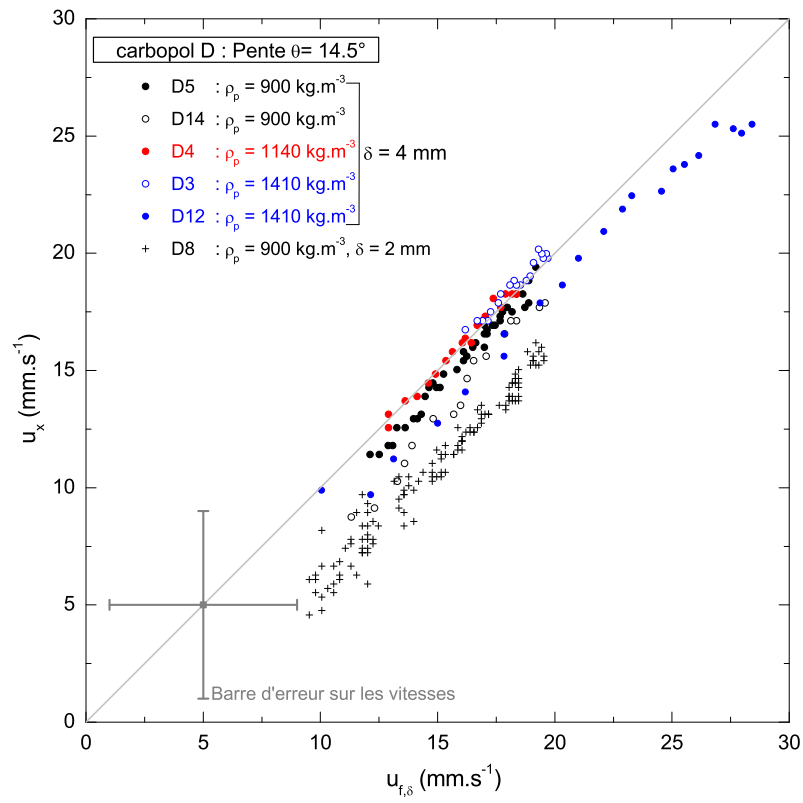


FIGURE 6.24 – Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le *carbopol D*.

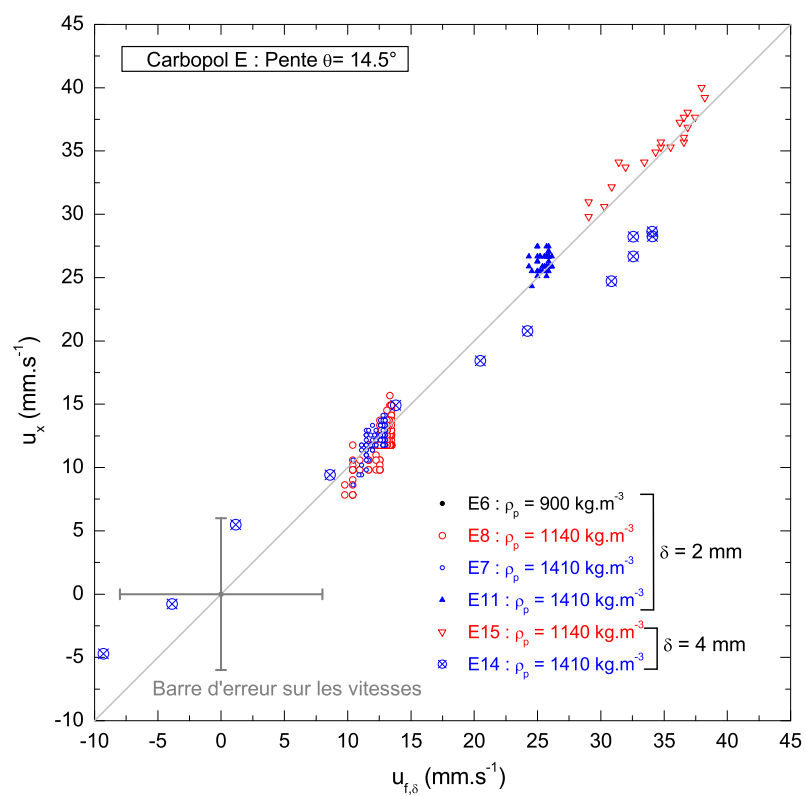


FIGURE 6.25 – Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le *carbopol E*.

$$u_s(y) = \frac{2}{9} (\rho_p - \rho) g R^2 \frac{1}{\mu(y)_\delta} \cos \theta \quad (6.9)$$

L'expression théorique de la viscosité dynamique locale est telle que :

$$\mu(y)_\delta = \frac{1}{2R} \int_{y+R}^{y-R} \mu(\zeta) d\zeta \quad \text{si } y + R < h_0 \quad (6.10)$$

L'expression de la viscosité dynamique locale est finalement :

$$\mu(y)_\delta = \left[\frac{(\rho g \sin \theta)^{\frac{n-1}{n}}}{2R(m-1)(m-2)} \left(\frac{k}{h_0} \right)^{\frac{1}{n}} (h_0 - \zeta) \left(1 - \frac{\zeta}{h_0} \right)^{-\frac{1}{n}} (h_0 + H_N(m-2) - \zeta(m-1)) \right]_{y+R}^{y-R} \quad (6.11)$$

avec $m = \frac{1}{n}$. Là aussi, nous utilisons pour nos calculs les paramètres rhéologiques de calage (voir l'annexe G).

Zone cisailée : la figure 6.26 montre qu'au premier ordre, les vitesses sont bien reproduites par les vitesses théoriques de Stokes. Toutefois, elles semblent systématiquement un peu plus grandes. Pour le cas des particules de densité égale à 900 kg.m^{-3} , il y a clairement désaccord.

Zone du plug : Globalement, la figure 6.27 montre une légère chute des particules. De plus, elle illustre une légère tendance de l'augmentation de la vitesse de chute avec la vitesse du tapis mais on ne relève pas d'effets gravitaires significatifs. La figure 6.28 confirme cette dernière observation.

Par ailleurs, signalons qu'il faut considérer les vitesses de chute avec une incertitude du même ordre de grandeur que la vitesse mesurée (c'est-à-dire de 0.5 mm.s^{-1}). L'incertitude sur la vitesse de chute est $\Delta u_y = \frac{2*\Delta y}{t_{total}}$, avec une incertitude sur la position verticale de la particule Δy l'ordre de la résolution de l'image.

6.4 Discussion

Nous avons calculée le nombre sans dimension Y pour tous nos essais selon :

$$Y = \frac{\tau_c}{(\rho_p - \rho) g \delta} \quad (6.12)$$

Nous obtenons pour nos expériences des valeurs de Y supérieures à celles énoncées dans la littérature (voir la figure 6.29). Cela signifie que toutes les particules devraient être au repos et ne pas chuter dans la zone du plug. Dans notre cas, toutes les particules qui se trouvent dans la zone du plug chutent y compris les particules moins denses que le fluide interstitiel,

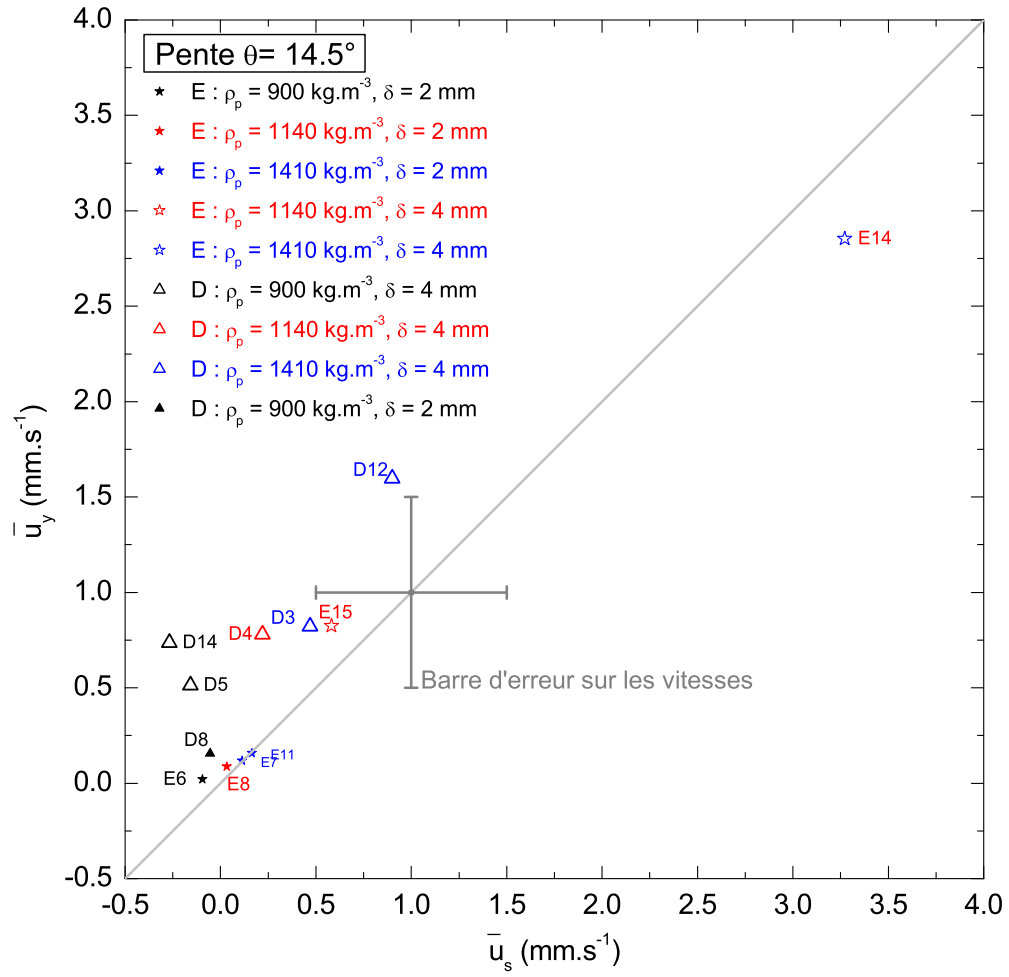


FIGURE 6.26 – La vitesse moyenne de chute expérimentale $\bar{u}_y$ en fonction de la vitesse limite de Stokes u_s : zone cisailée.

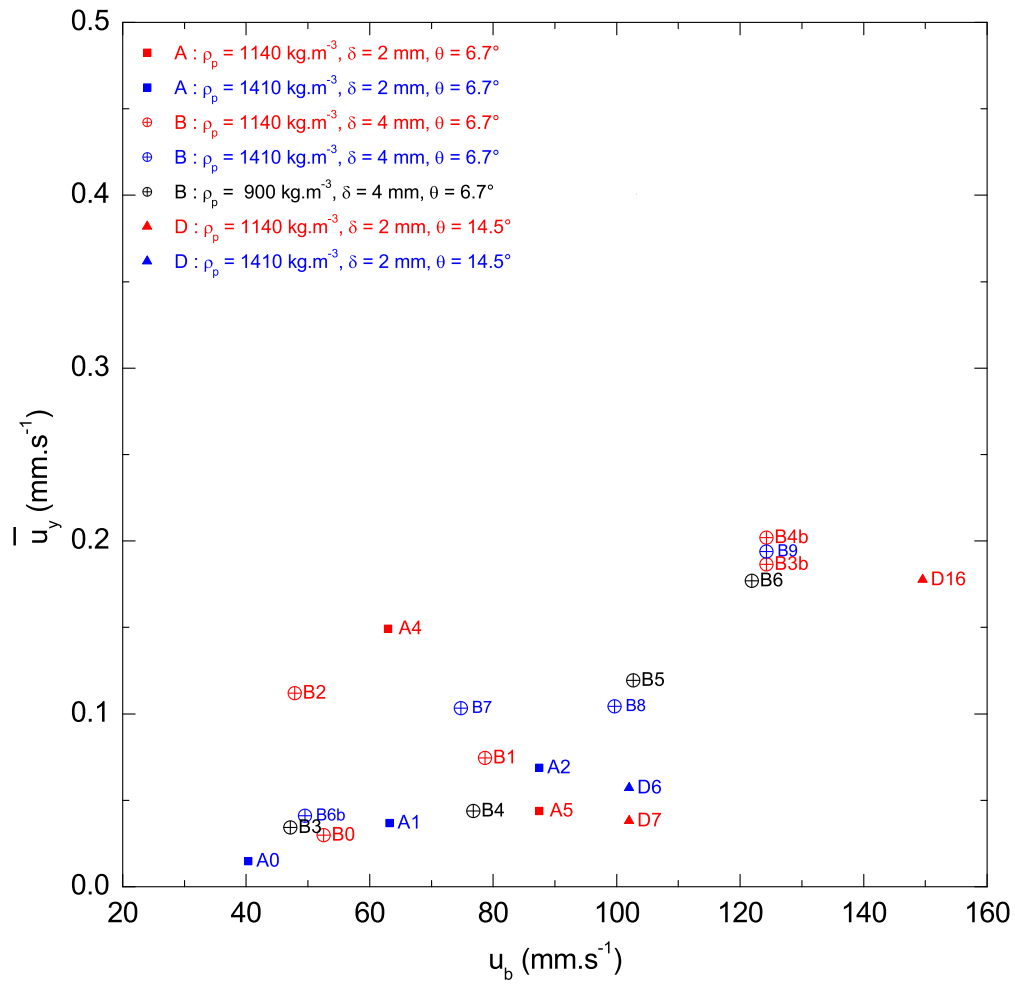


FIGURE 6.27 – La vitesse moyenne de chute expérimentale $\bar{u}_y$ en fonction de la vitesse du tapis u_b : zone du plug.

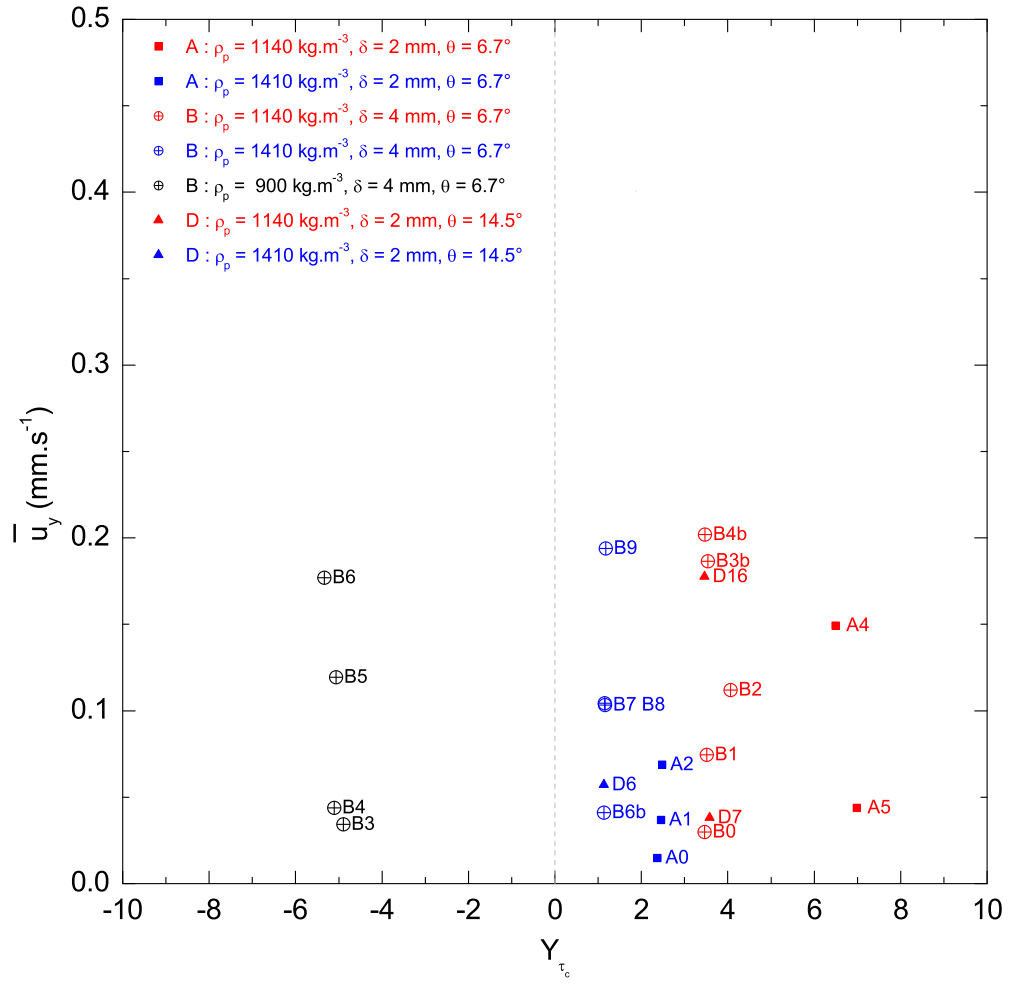


FIGURE 6.28 – La vitesse moyenne de chute expérimentale $\bar{u}_y$ en fonction du nombre sans dimension Y : zone du plug.

d'une masse volumique de 900 kg.m^{-3} .

Le nombre de Reynolds particulaire $R_e = \bar{R}_e(y)$ et le nombre de Stokes particulaire $S_t = \bar{S}_t(y)$ pour chacun de nos essais sont calculés selon :

$$R_e(y) = \frac{\rho \delta \bar{u}_y}{\mu(y)} \quad (6.13)$$

$$S_t(y) = \frac{\rho \delta \bar{u}_{f,\delta}(y)}{\mu(y)} \quad (6.14)$$

Rappelons que ρ est la masse volumique du fluide, δ est le diamètre de la particule, $\bar{u}_y$ est la vitesse moyenne de chute expérimentale, $\mu(y)$ est la viscosité dynamique locale du fluide calculée selon l'expression 6.11 et $\bar{u}_{f,\delta}(y)$ est la vitesse moyenne du fluide calculée selon 6.6.

Nous avons réalisé nos essais avec de faibles Reynolds particulières et des nombres de Stokes inférieurs à 1 (voir la figure 6.30). Ce dernier point signifie que la particule a le temps de s'ajuster à toute variation de vitesse du fluide. Il en résulte que la particule évolue à la vitesse du fluide. Les résultats sur le bon accord entre les vitesses longitudinales et la vitesse du fluide confirment ce point.

En conclusion, la vitesse longitudinale et les vitesse de chute de toutes les particules mises en œuvre dans nos expériences, avec différentes préparations de carbopol et pour différentes vitesses, sont globalement bien reproduites, respectivement par la vitesse théorique du fluide et par la vitesse de Stokes. Nous avons utilisé pour les expressions théoriques des vitesses, les paramètres rhéologiques de calage des matériaux utilisés (voir la partie 5.5.1) car les expressions théoriques sont très sensibles à ces paramètres. Nous avons bien compris la chute d'une particule dans un fluide à seuil mais le cas de la chute d'une particule d'une masse volumique (900 kg.m^{-3}) plus faible que celle du fluide interstitiel (1000 kg.m^{-3}) reste à élucider avec des comparaisons plus fines avec des mesures au rhéomètre [70].

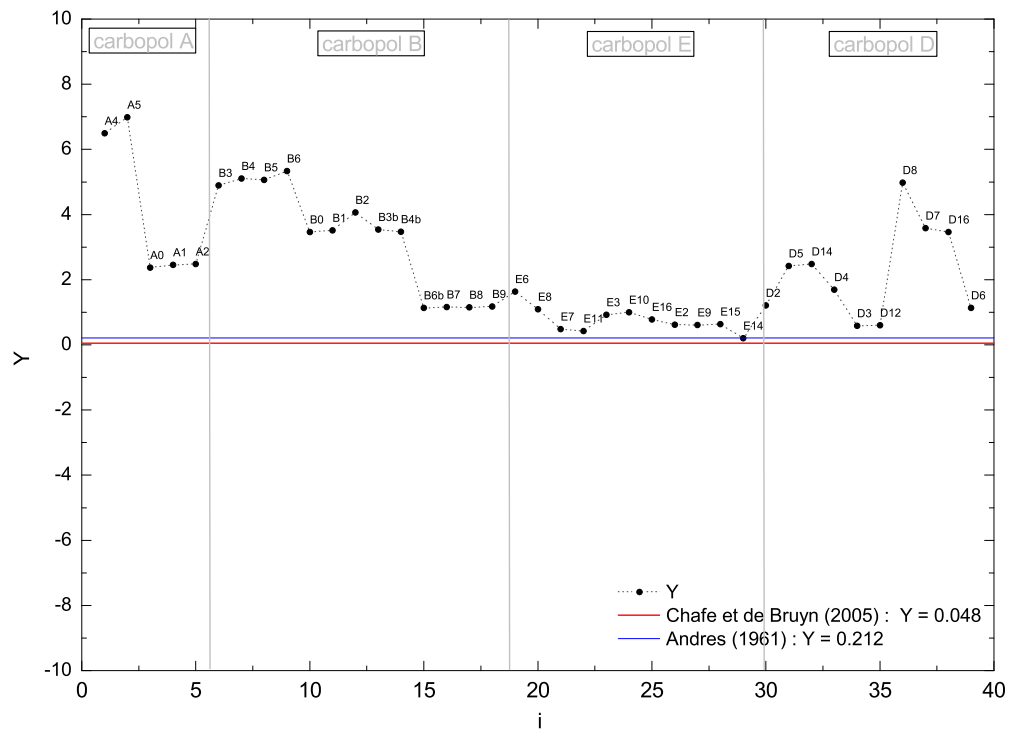


FIGURE 6.29 – Le nombre Y pour chaque essai : positionnement de deux valeurs typiques du nombre sans dimension Y dans la littérature [19].

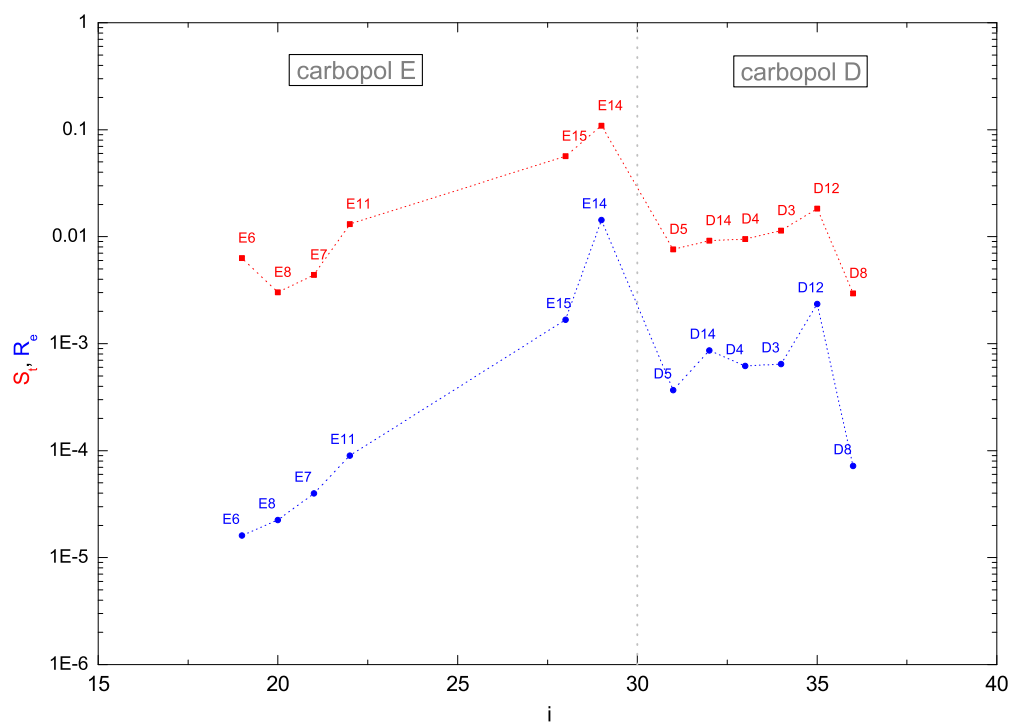


FIGURE 6.30 – Le nombre de Reynolds et le nombre de Stokes de la particule plour chaque série d'essai.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Les laves torrentielles sont des écoulements gravitaires composés d'un mélange complexe d'eau de débris de toutes tailles, allant des particules fines jusqu'aux blocs métriques [1, 47]. Les outils conventionnels de rhéométrie ne sont pas adaptés pour de tels écoulements complexes. Les propriétés mécaniques et la dynamique de ce type d'écoulement ne sont pas encore pleinement comprises. Les données expérimentales sont encore rares et très difficiles à obtenir, du fait des techniques sophistiquées requises pour ce types d'études [20], et de la difficulté à contrôler correctement tous les paramètres impliqués (les propriétés rhéologiques du fluide, conditions initiales et conditions aux limites, ...).

Dans cette étude, nous avons prospecté la possibilité d'utiliser un canal adapté pour la caractérisation des propriétés rhéologiques de fluides complexes. Le principe consiste à étudier des fluides viscoplastiques avec cet outil puis de comparer les résultats aux mesures obtenues avec des outils de rhéométrie conventionnels.

Le dispositif expérimental développé pour notre étude, consiste en un plan incliné muni d'un fond mobile, dont le mouvement s'oppose à la vitesse naturelle de l'écoulement. Comme cela a été montré dans d'autres études [43, 38], ce concept constitue un moyen expérimental intéressant qui permet d'étudier les coulées gravitaires en détails. Les dimensions de notre dispositif expérimental sont relativement grandes (3 m de long et jusqu'à 0.6 m de large), ce qui en fait un outil bien adapté pour étudier différents types de fluides complexes, y compris des matériaux naturels issues de laves torrentielles.

Nous avons choisi pour nos expériences deux fluides viscoplastiques [56], le carbopol et le kaolin, pour modéliser les coulées naturelles de laves torrentielles. Ces deux fluides ont été souvent employés, en première approximation, pour modéliser avec succès cet écoulement géophysique [21, 88]. Nous avons constaté au cours de nos expériences que les propriétés rhéologiques du carbopol ne sont pas parfaitement stables. En effet, on observe toujours une légère évolution des paramètres, notamment du seuil de contrainte, à la fois dans le temps et sous cisaillement. C'est pour cela qu'il est utile de réaliser systématiquement des mesures rhéométriques sur des échantillons prélevés avant et après chaque expérience sur le canal. De cette manière, les propriétés du fluide sont, sinon contrôlées, du moins mieux connues.

Les résultats présentés dans notre étude montre que le canal incliné à fond mobile a atteint

son principal objectif, notamment en générant des coulées *stationnaires* dans le référentiel du laboratoire. De façon systématique, la coulée se présente sous la forme d'un front immobile, suivie d'une zone uniforme dont l'épaisseur augmente avec la vitesse du tapis.

L'accord entre les mesures de vitesse-hauteur et les prédictions théoriques, d'un modèle de vitesse moyenne égale à la vitesse du tapis, constitue une première validation du dispositif expérimental. En effet, cela montre qu'au moins dans la zone uniforme, le rôle du tapis se limite à modifier la vitesse moyenne de l'écoulement. Hormis cette translation de la vitesse moyenne, l'écoulement, et en particulier le profil de vitesse, reste le même que dans un canal classique. Réciproquement, la relation expérimentale obtenue entre épaisseur de l'écoulement et vitesse du tapis peut donc être exploitée comme une mesure des propriétés rhéologiques du matériau. Soulignons également que le bon accord entre les mesures et la théorie confirme la quasi-absence d'effets de bords dans notre dispositif ou d'un phénomène de glissement de fluide sur le tapis, puisque ces effets ne sont pas pris en compte dans le modèle.

De plus, l'accord satisfaisant entre la forme du front de la coulée et les prédictions d'un modèle simple de couche mince constitue une seconde validation de notre dispositif. On en conclut que la forme des coulées observée dans notre canal (si l'on exclue la zone influencée par la paroi amont) est la même que celle que l'on observerait dans un canal classique, pour peu évidemment que l'on arrive à obtenir des solutions de type ondes progressives dans un tel canal. En outre, d'un point de vue plus fondamental, cet accord souligne la pertinence de modélisations de type Saint-Venant jusque dans un très proche voisinage du front. Soulignons aussi que la hauteur de la coulée dans la zone uniforme est bien reproduite par ce modèle.

Plus généralement, les perspectives offertes par un tel dispositif, muni d'un fond mobile, pour l'étude d'écoulements à surface libre impliquant des matériaux complexes, tels que les laves torrentielles, sont nombreuses : mesures locales de vitesses (avec un fluide transparent), l'étude d'apparition d'instabilités dans le fluide, étude des propriétés rhéologiques des mélanges fluide-grains (phénomènes de migration et ségrégation), la formation du front granulaire et son influence sur l'ensemble de la coulée. À ce propos, nos expériences avec une particule isolée dans le fluide constitue une première approche pour l'étude des mélanges. Enfin, nos résultats constituent également une base de données qui pourrait permettre de vérifier la validité de différents modèles proposés pour des écoulements de fluides complexes [46, 42, 47].

Annexe A

Courbes d'écoulement en régime permanent : cas du carbopol

La mention *av* et *ap* indique si le matériau a été échantillonné avant ou après l'essai sur le canal.

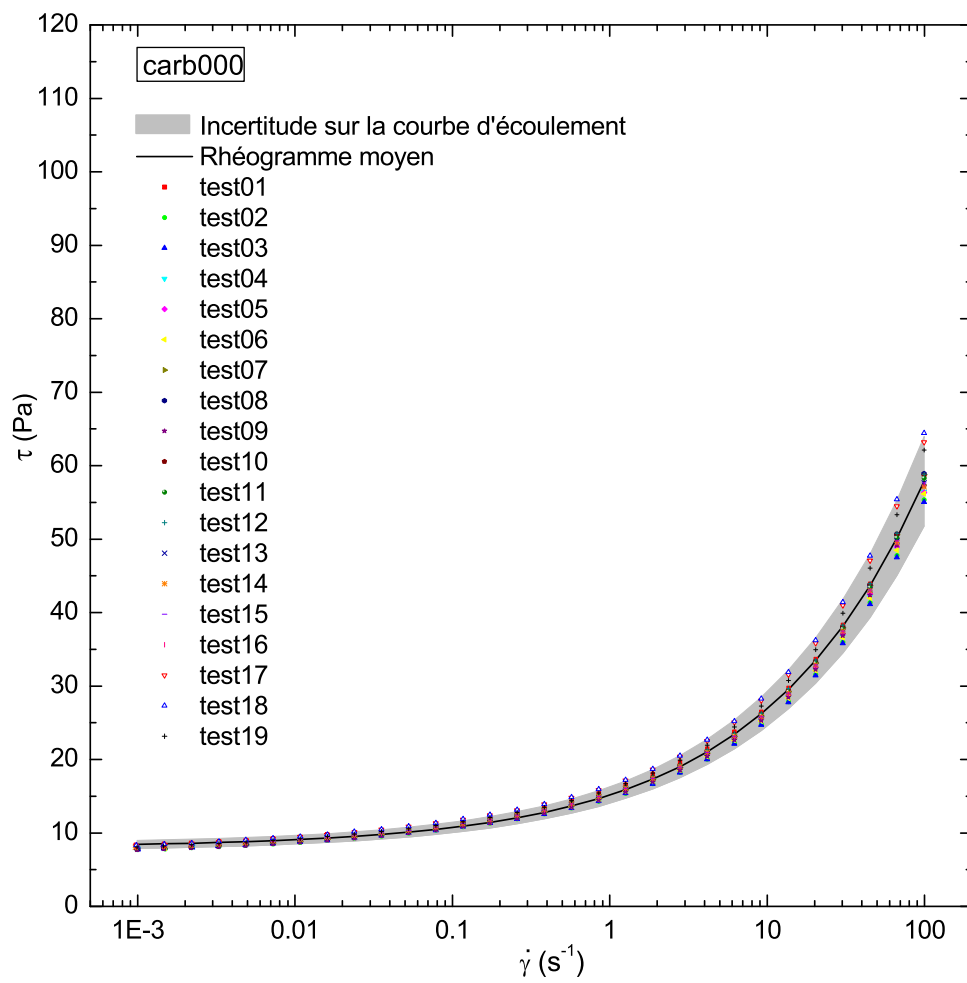


FIGURE A.1 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb000 ap*.

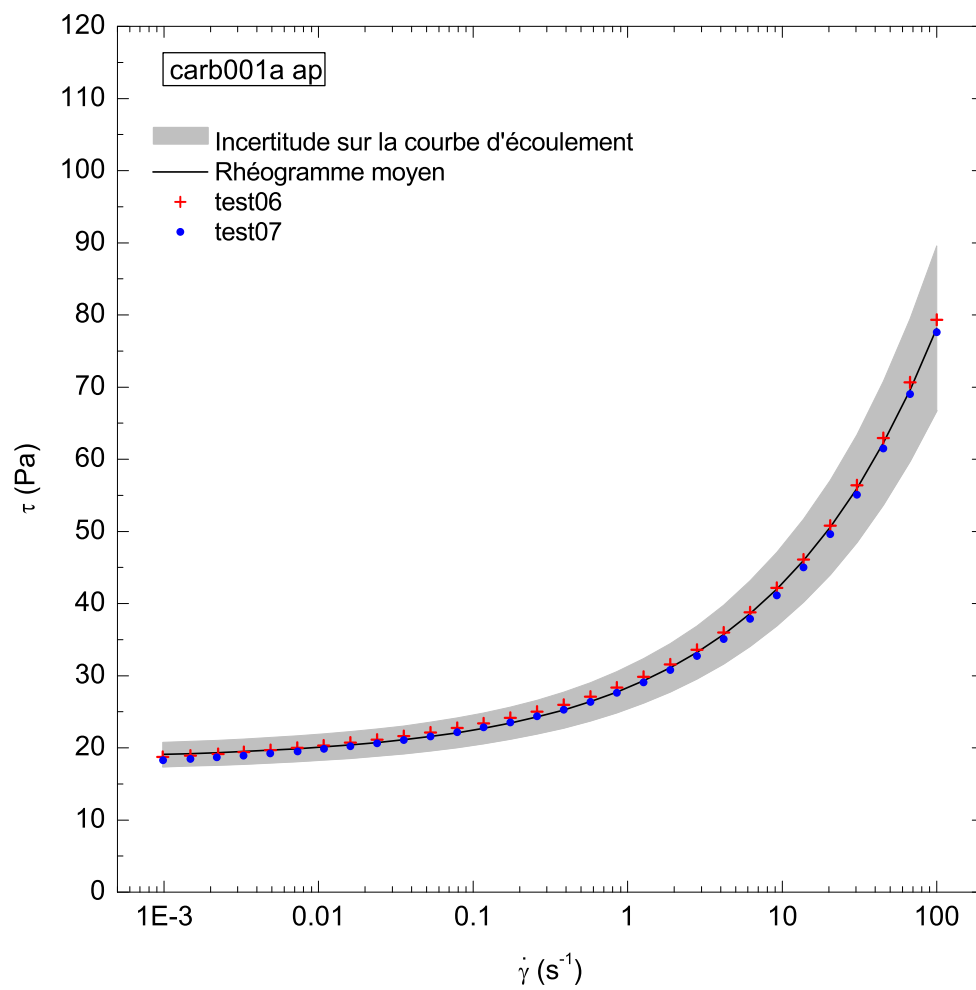


FIGURE A.2 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb001a ap*.

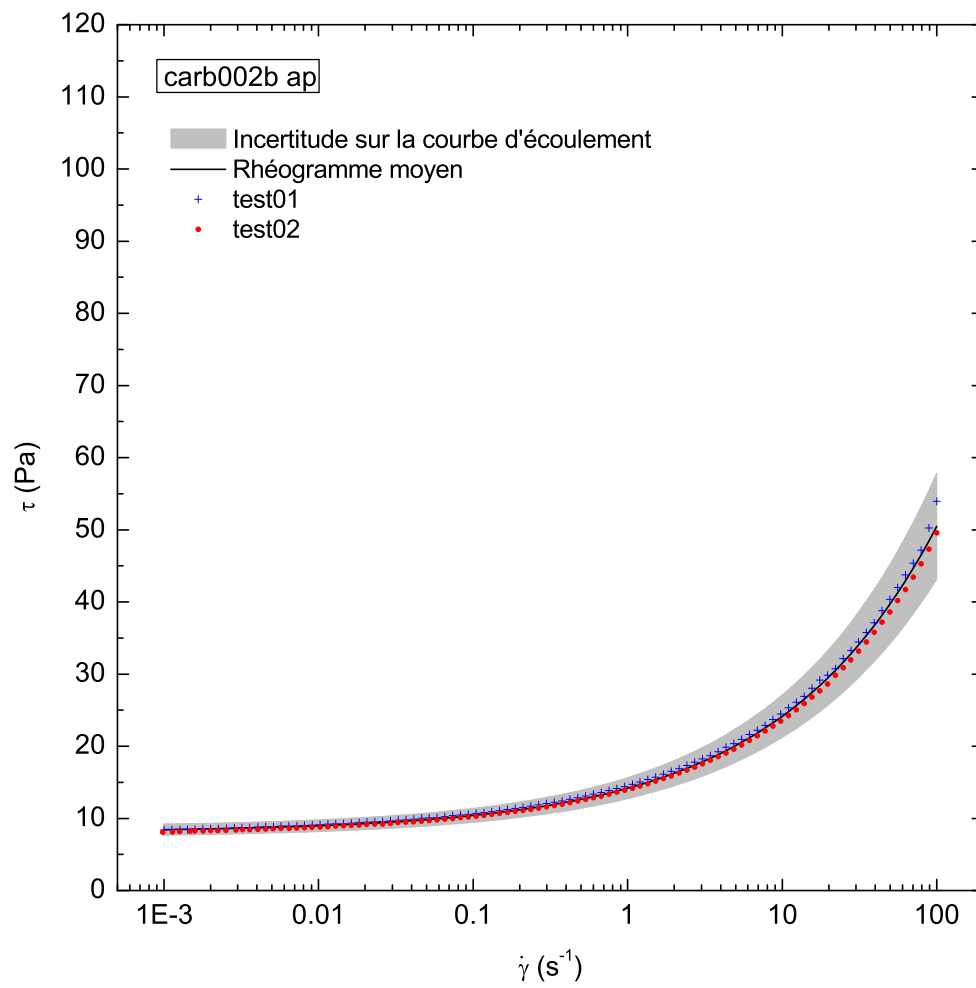


FIGURE A.3 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb002b ap*.

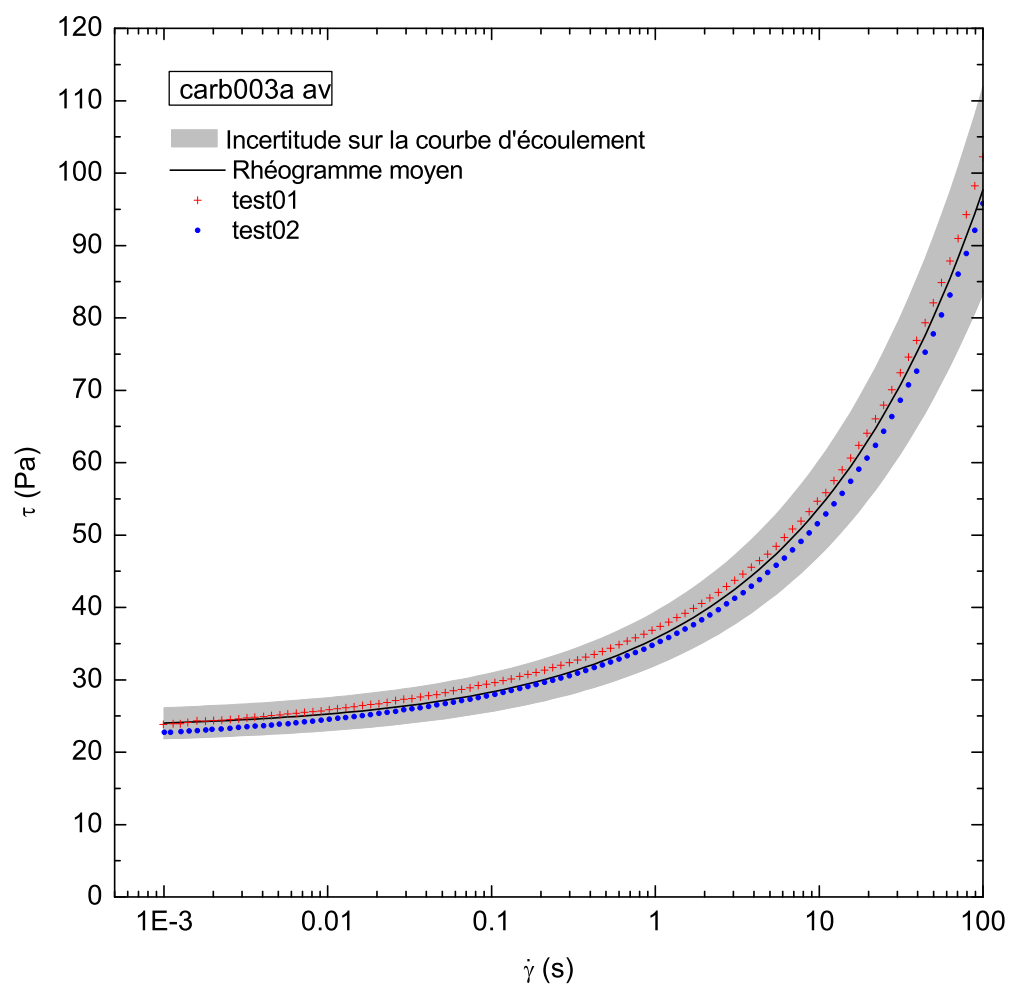


FIGURE A.4 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb003a av*.

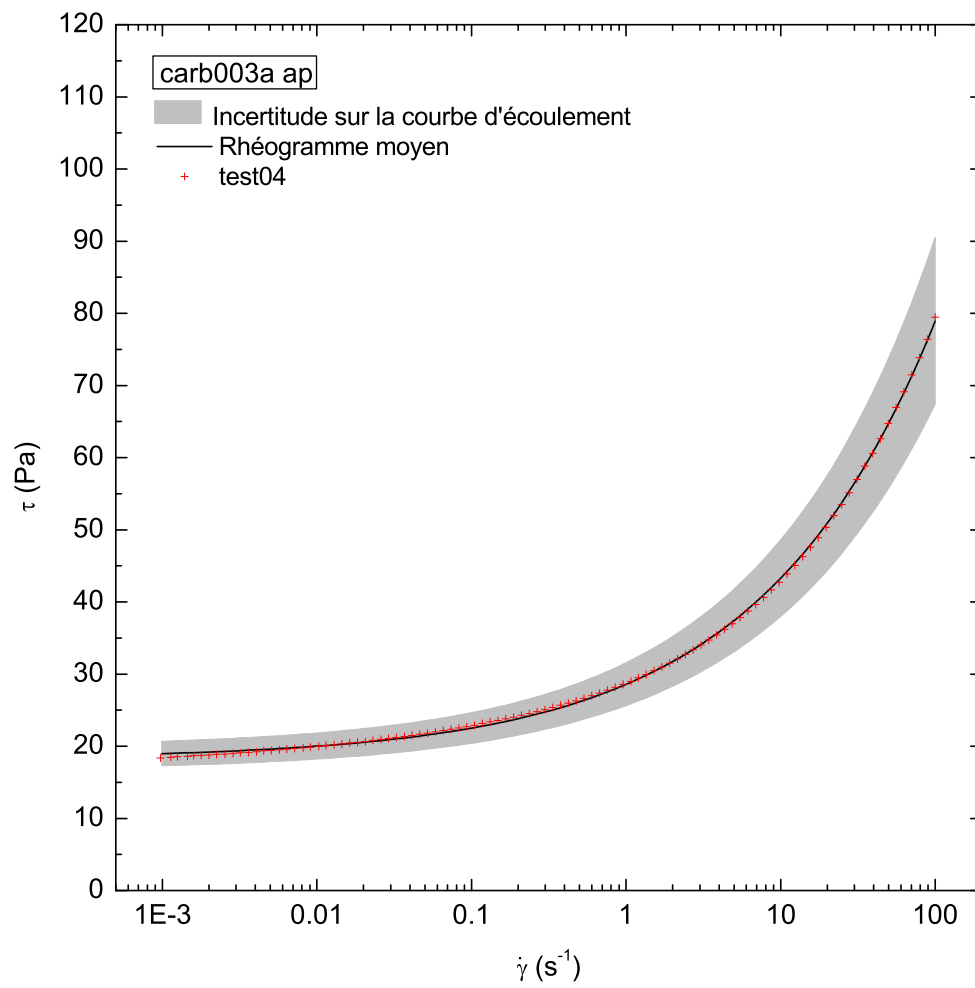


FIGURE A.5 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb003a ap*.

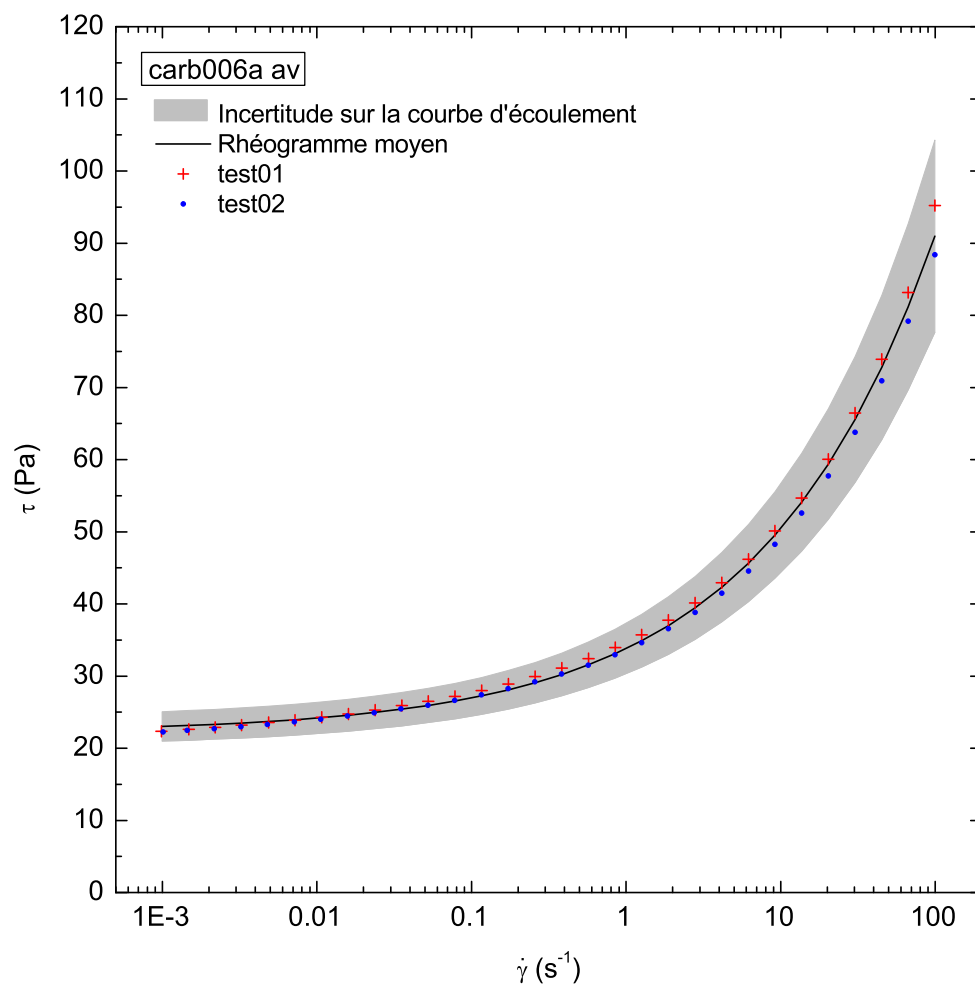


FIGURE A.6 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb006a av*.

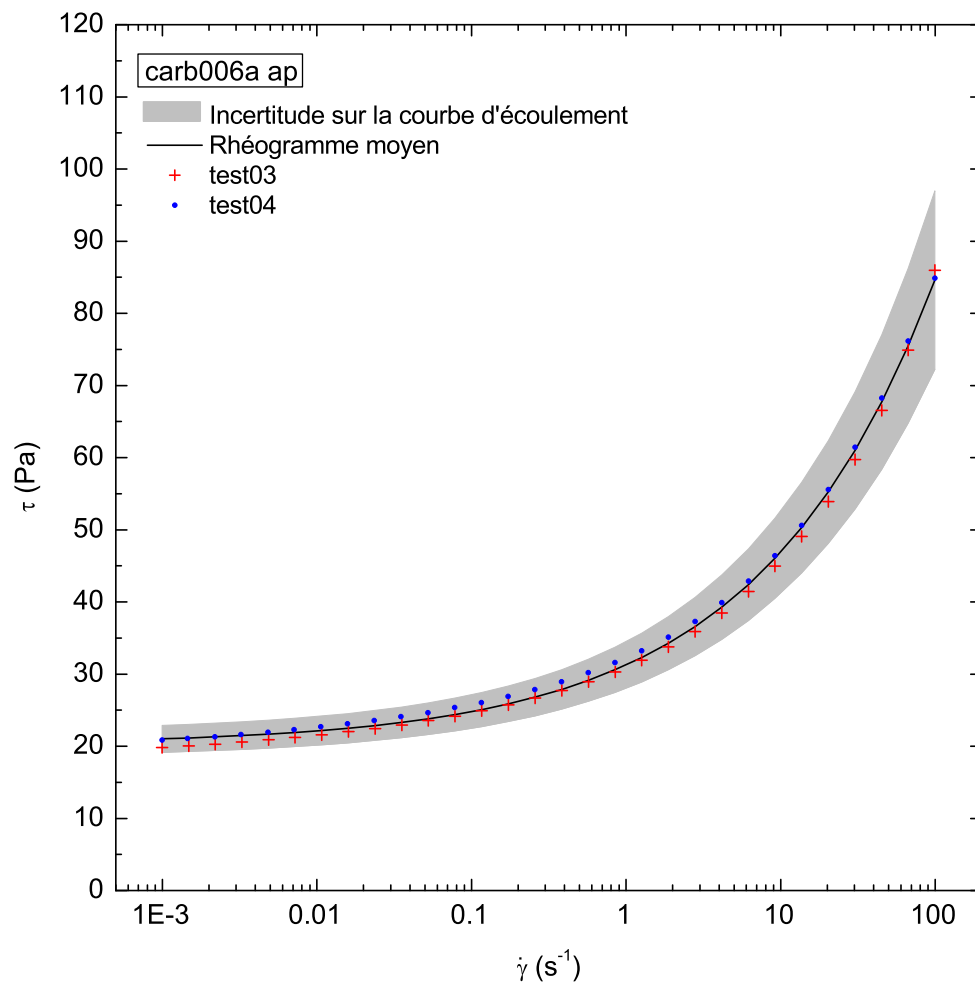


FIGURE A.7 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb006a ap*.

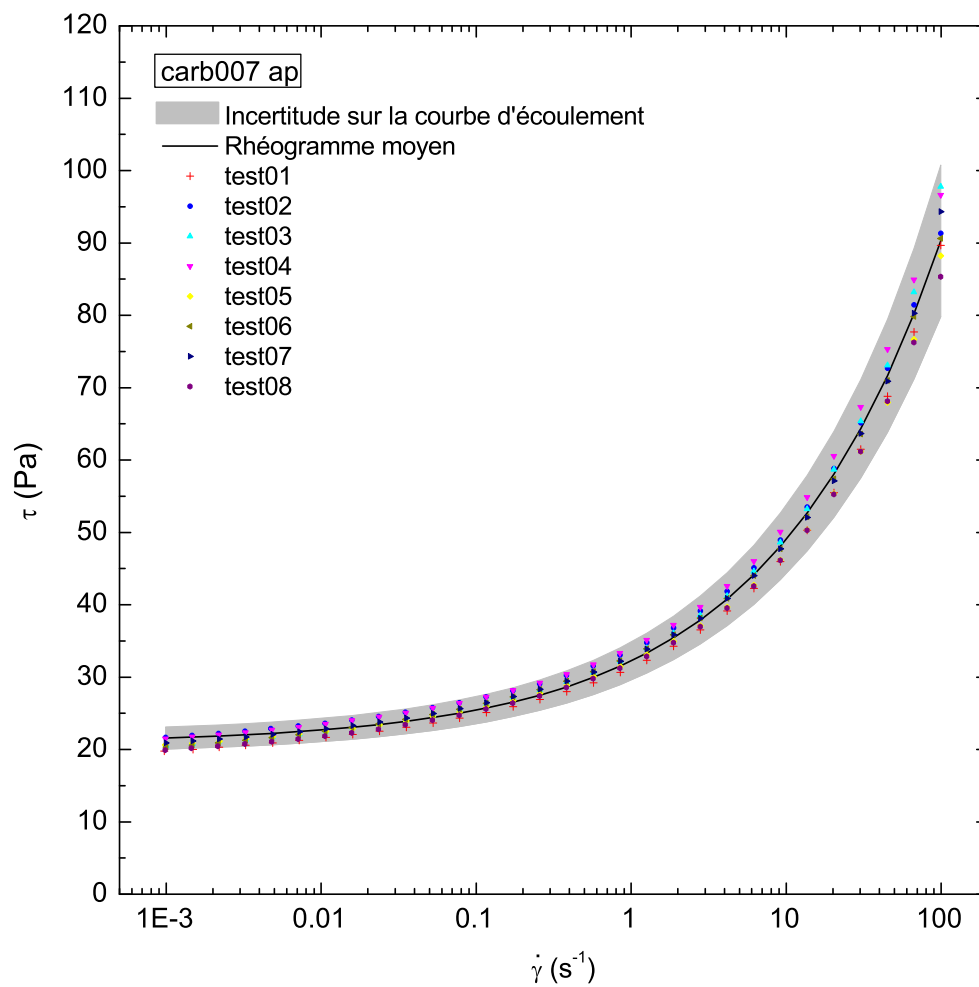


FIGURE A.8 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb007 ap*.

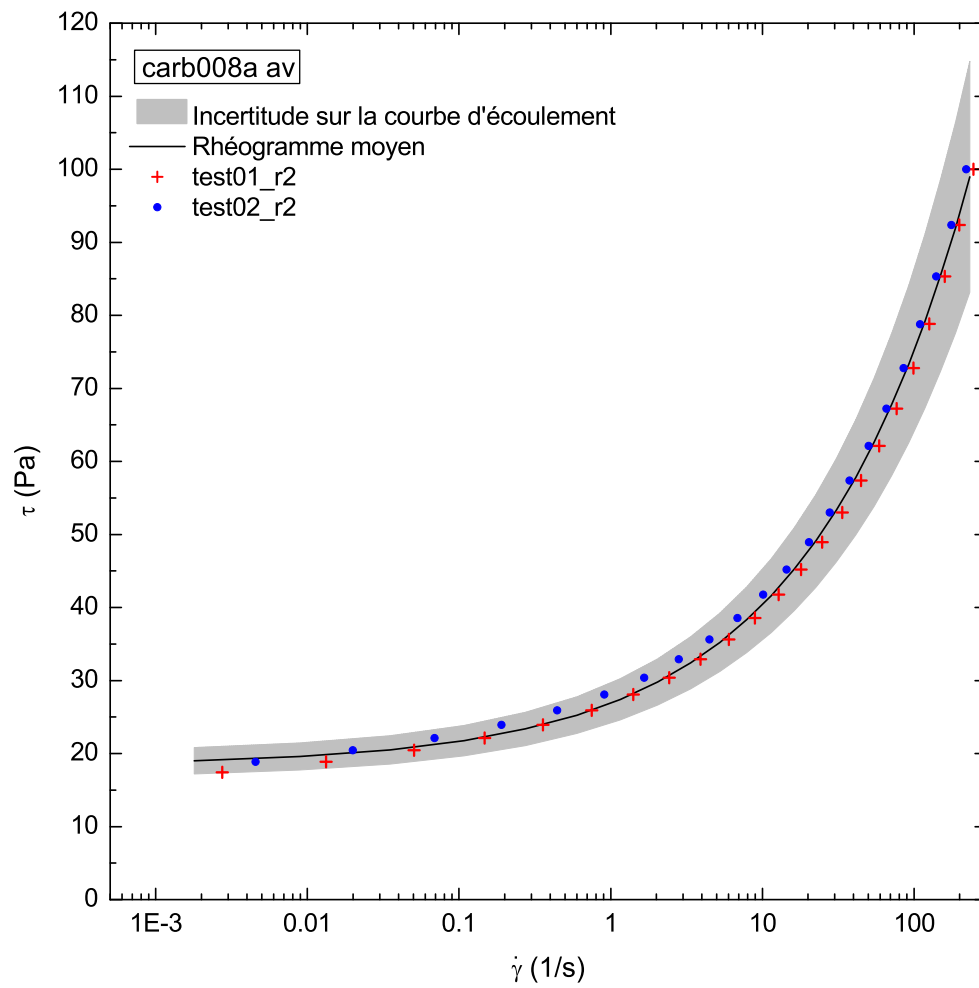


FIGURE A.9 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb008a av*.

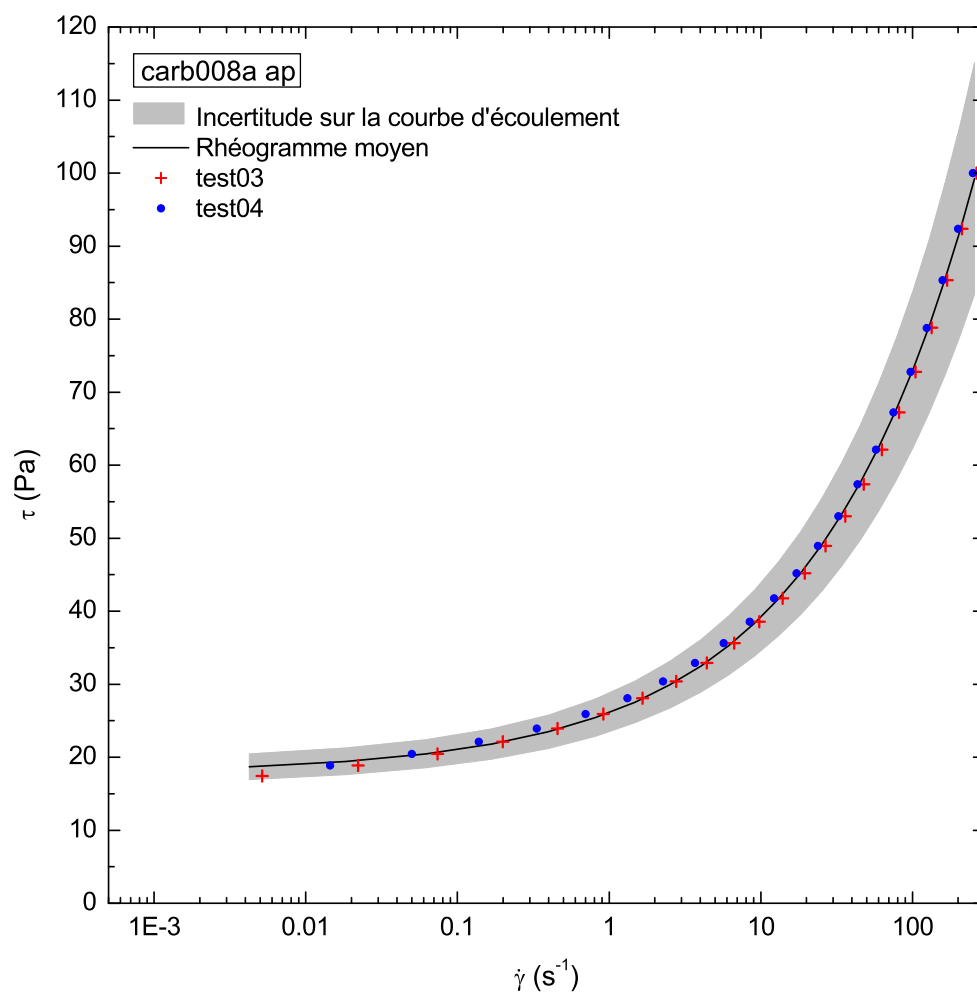


FIGURE A.10 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb008a ap*.

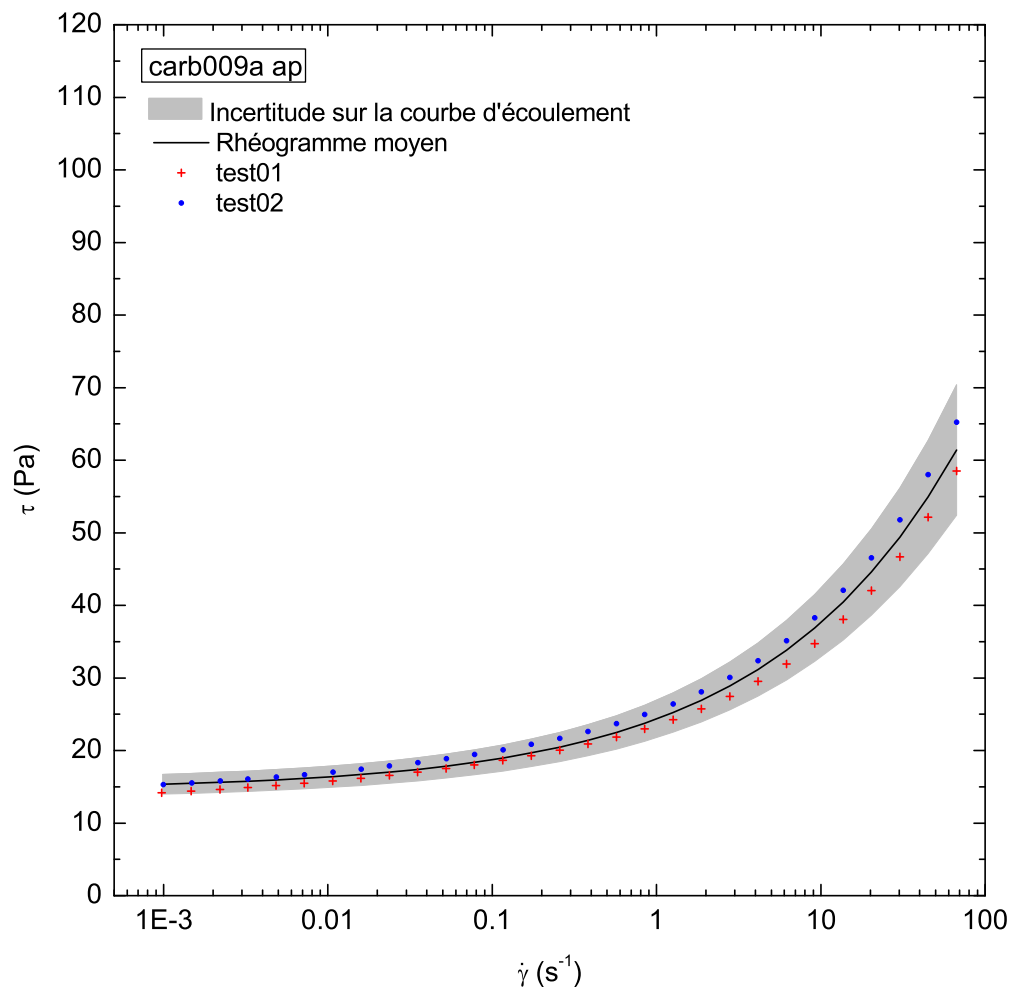


FIGURE A.11 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb009a ap*.

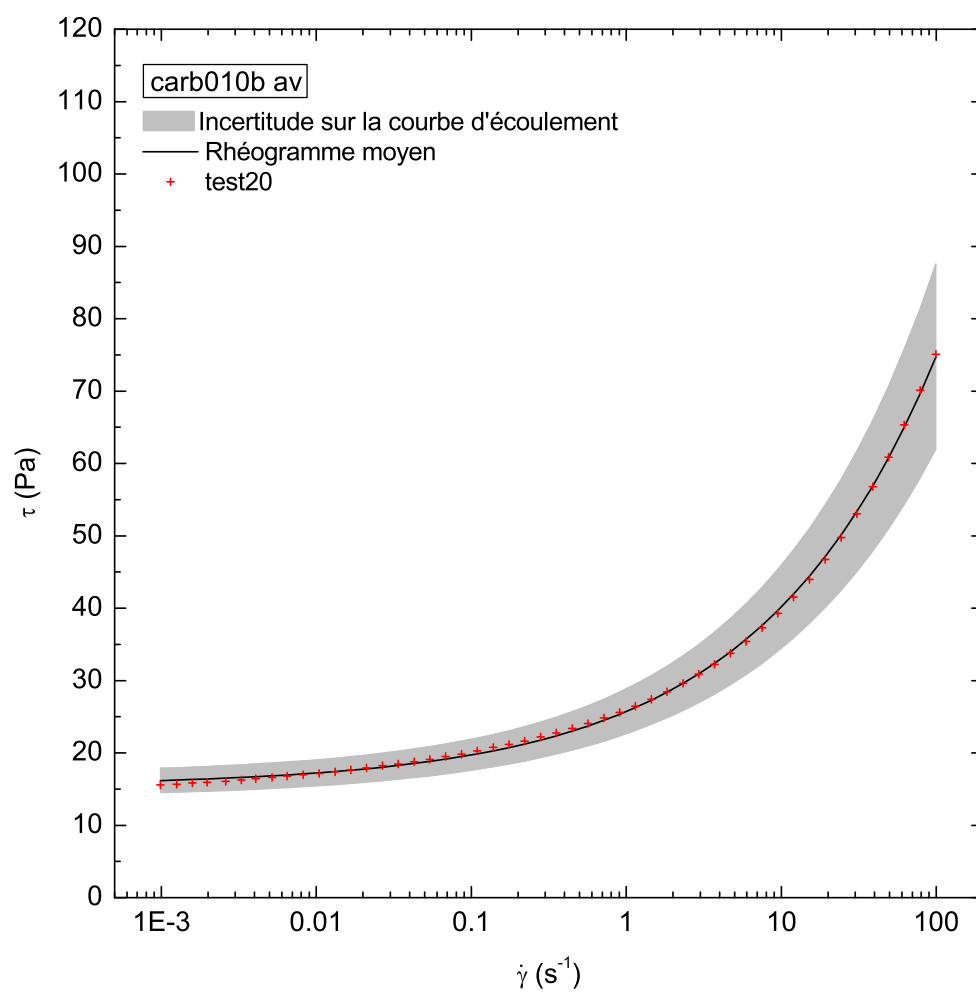


FIGURE A.12 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb010b av*.

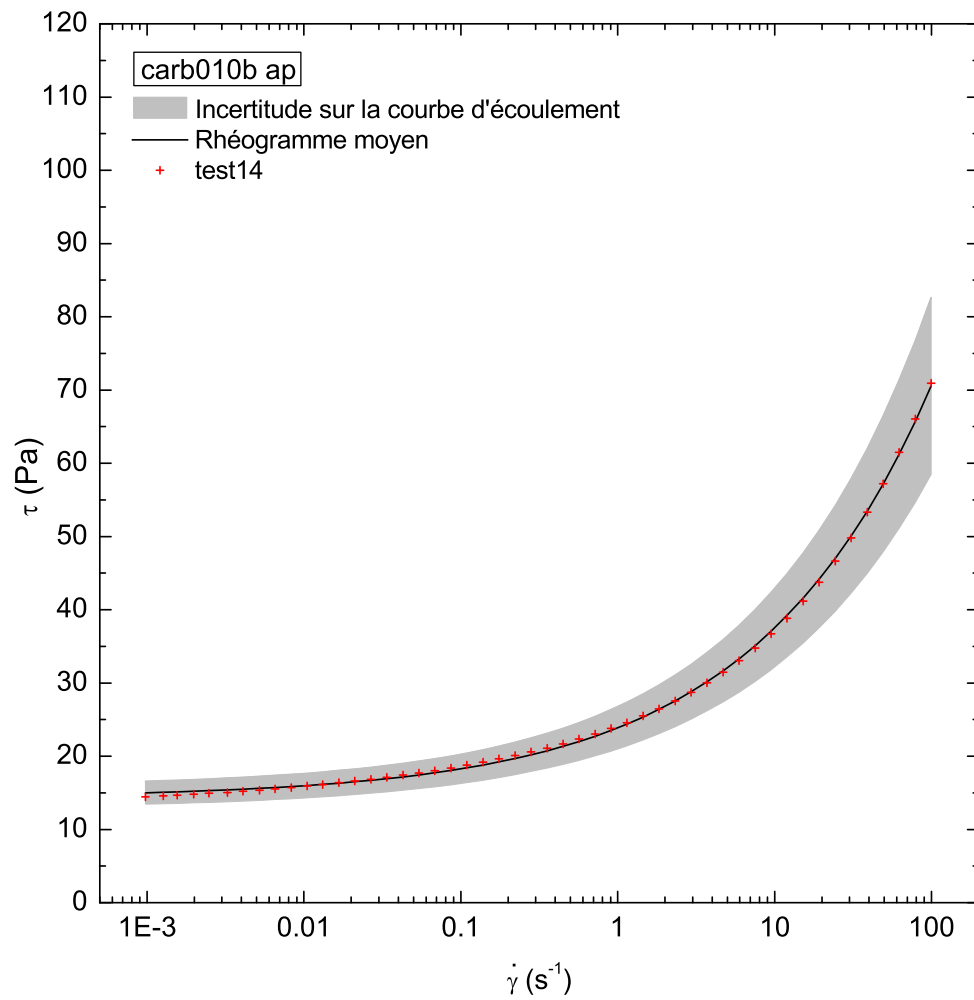


FIGURE A.13 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb010b ap*.

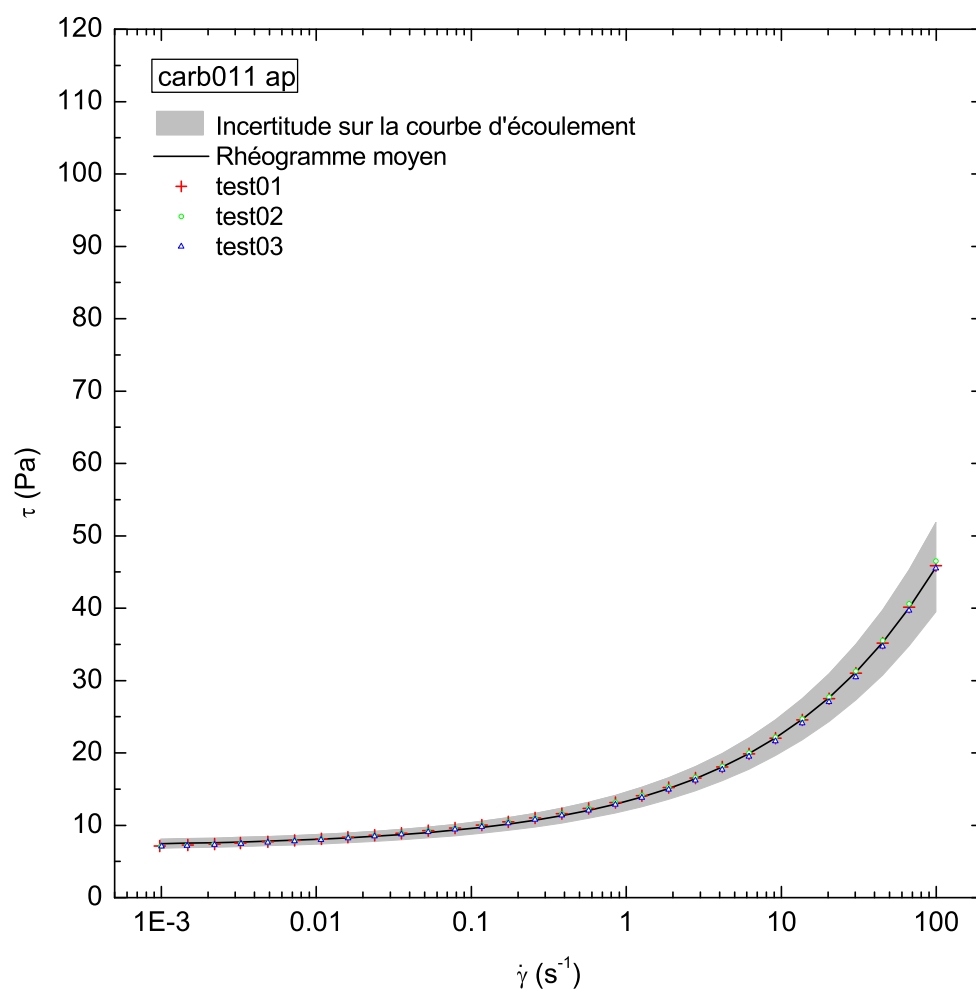


FIGURE A.14 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : *carb011 ap*.

Annexe B

Courbes d'écoulement en régime permanent : cas du kaolin

Nota : La mention *ap* indique que le matériau a été échantillonné après l'essai sur le canal. Dans le cas du kaolin, tous les matériaux ont été échantillonnés après l'essai sur le canal (*ap*). Sur ces figures, nous avons présenté les essais *r1*. Dans le cas du kaolin, nous n'avons pas réalisé de répétitions *r2*.

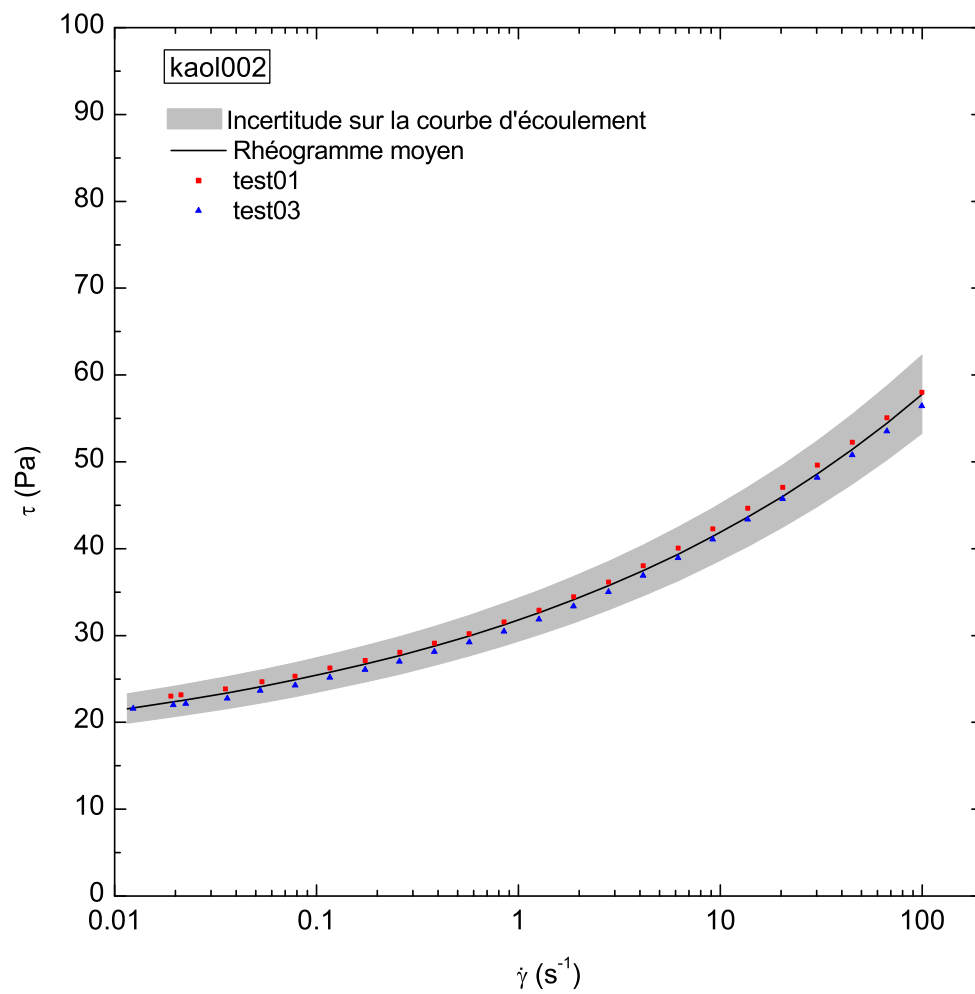


FIGURE B.1 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol002*.

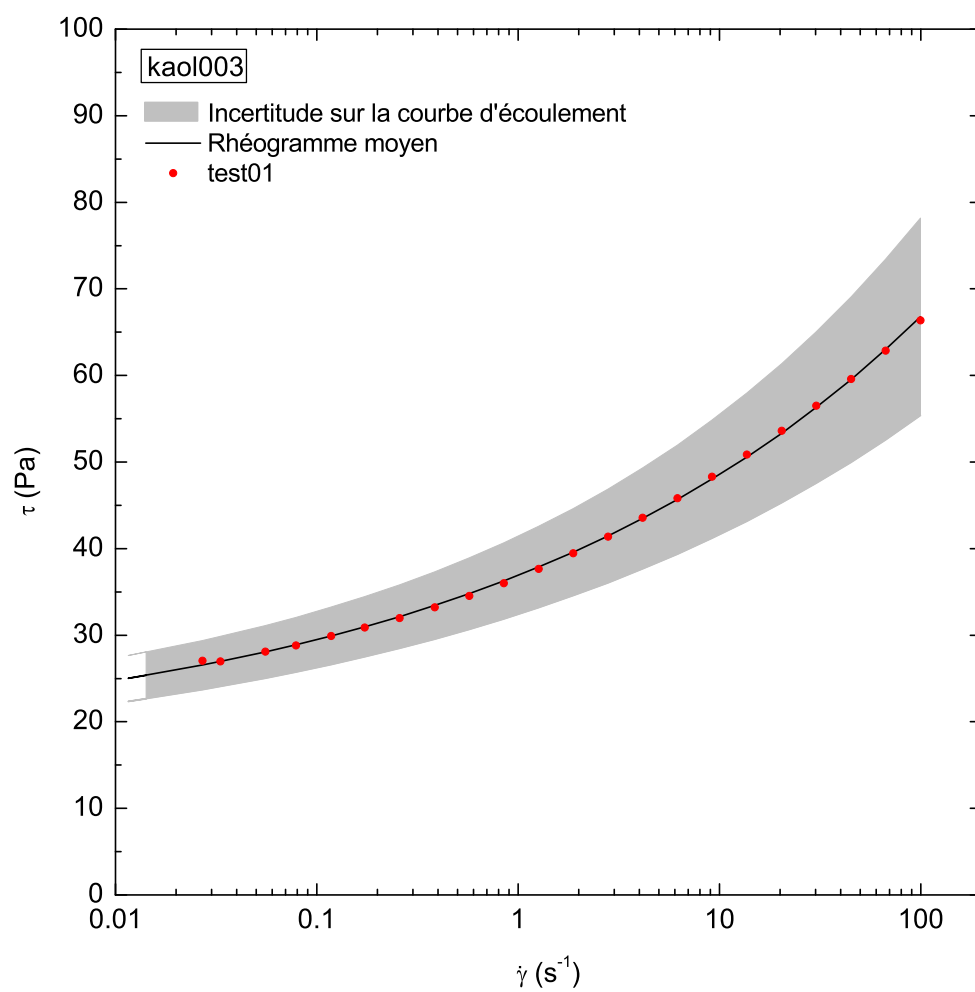


FIGURE B.2 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol003*.

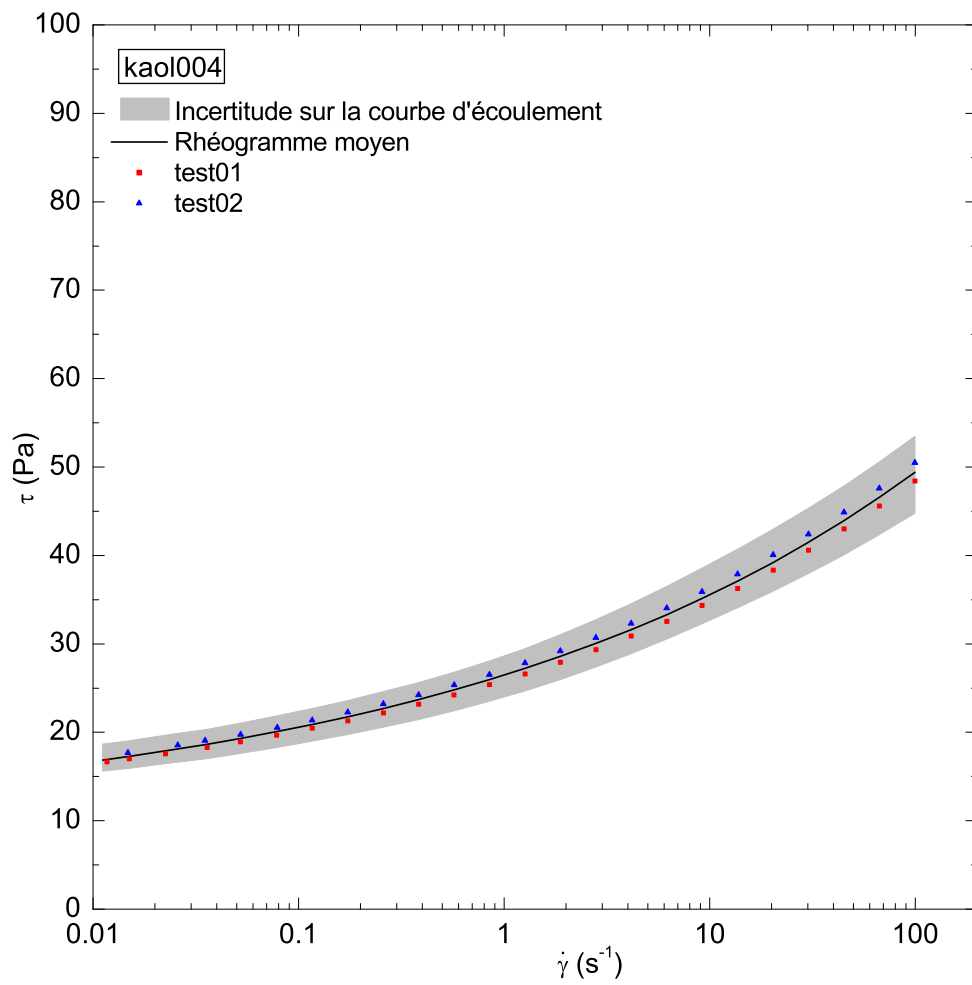


FIGURE B.3 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol004*.

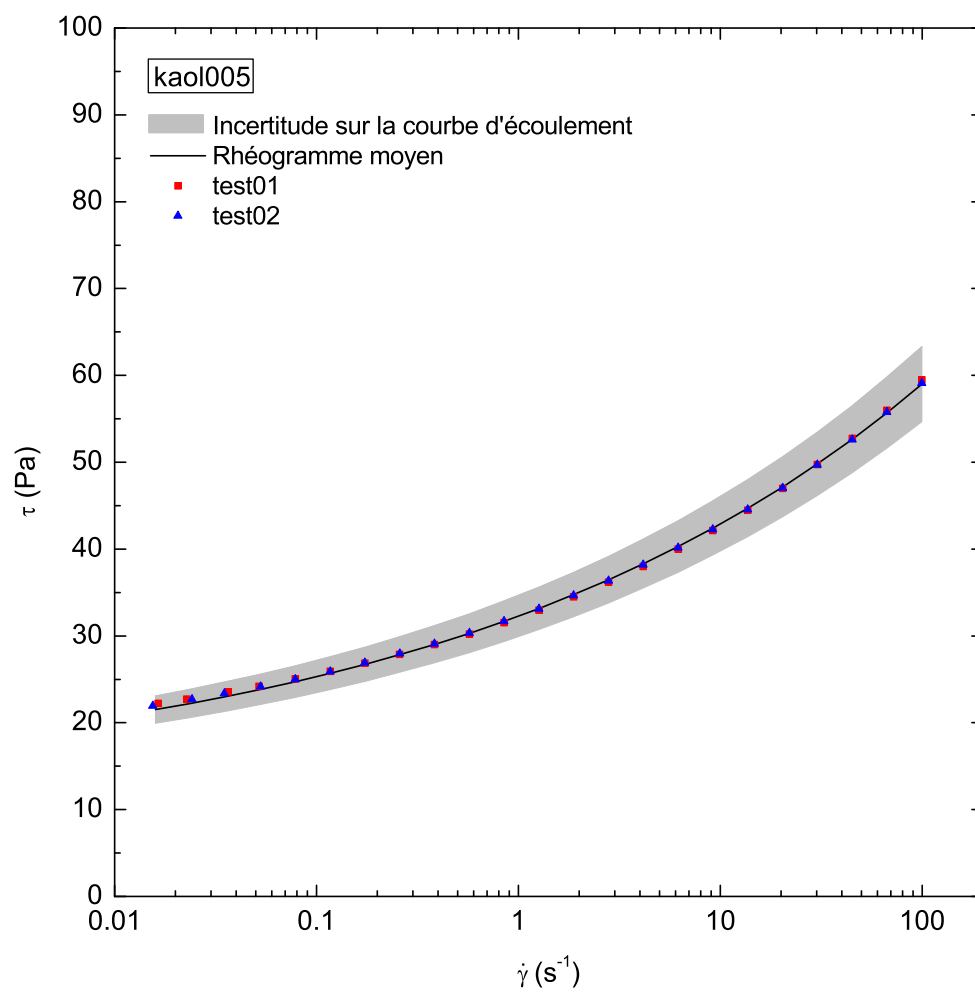


FIGURE B.4 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol005*.

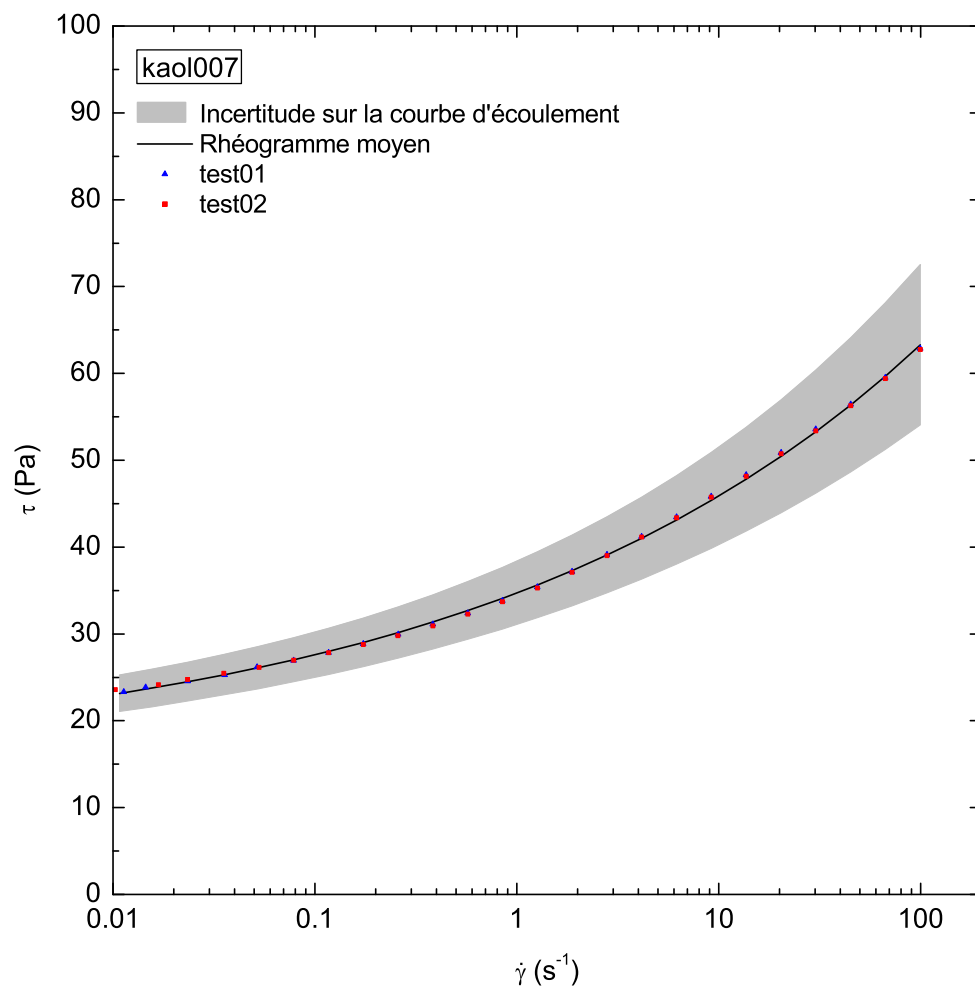


FIGURE B.5 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol007*.

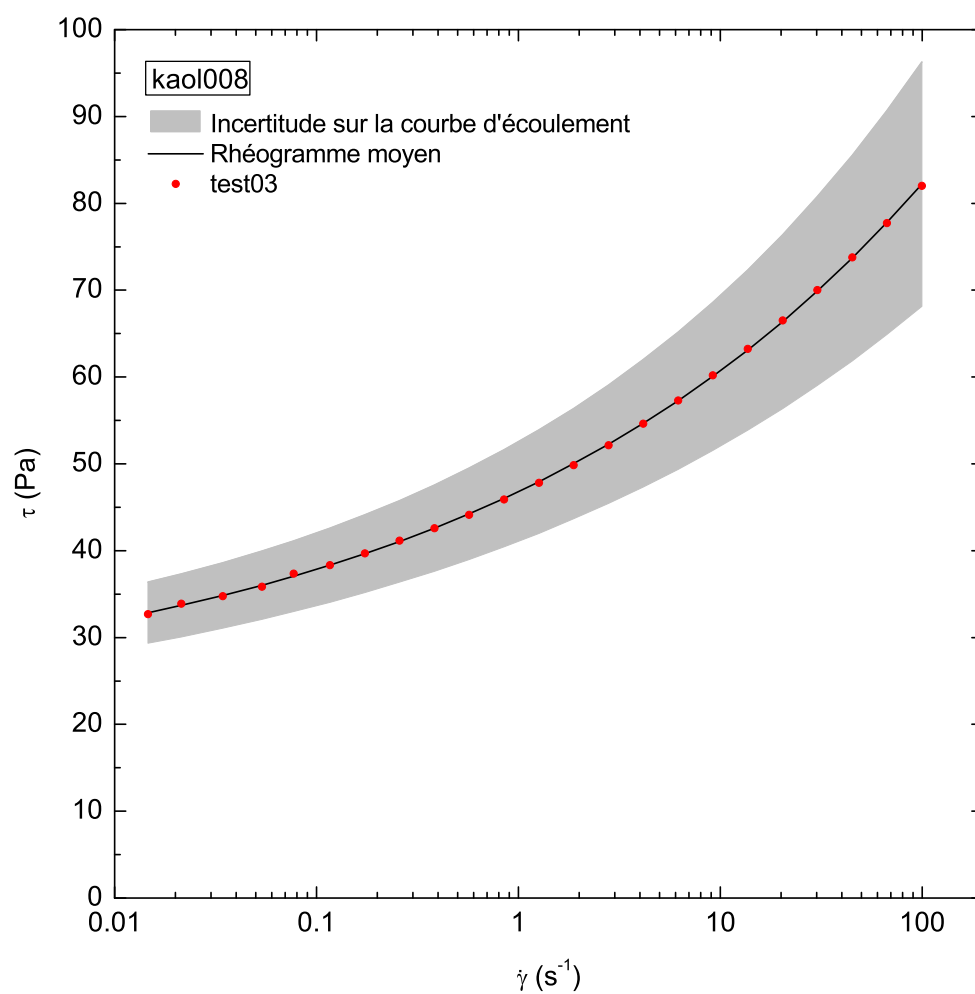


FIGURE B.6 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol008*.

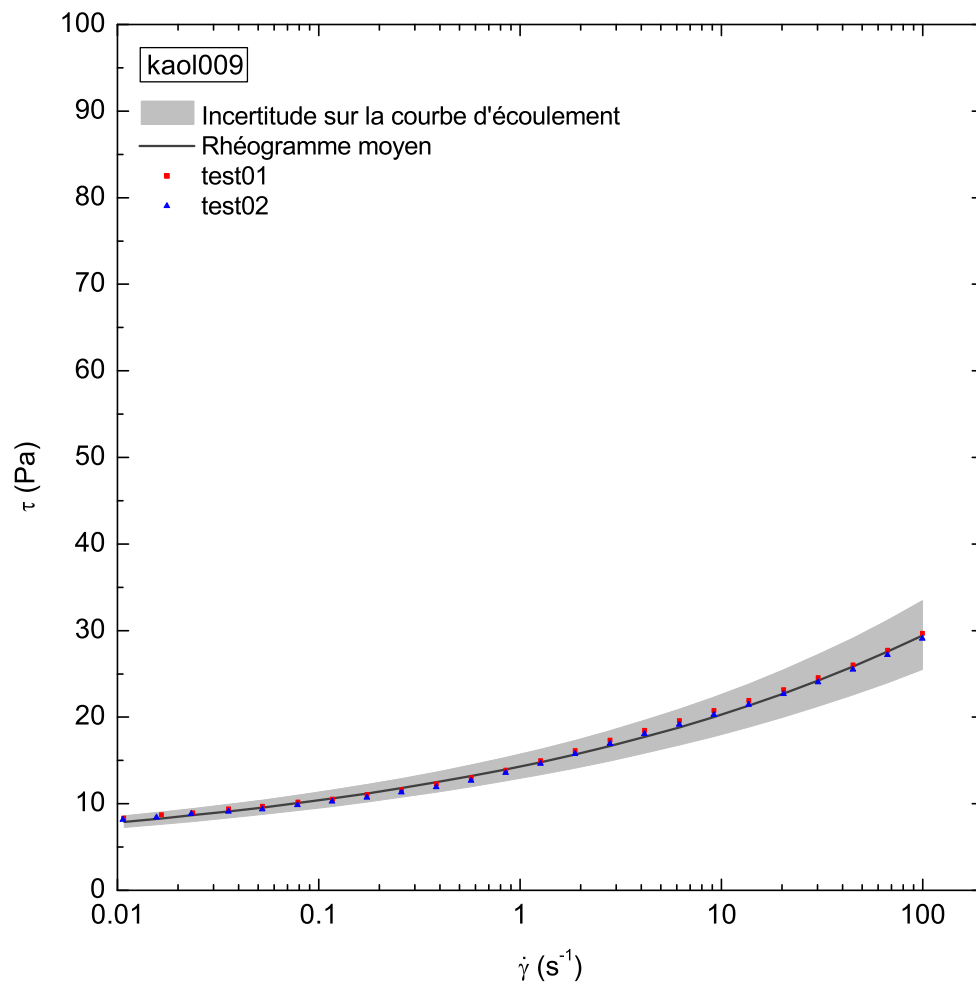


FIGURE B.7 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol009*.

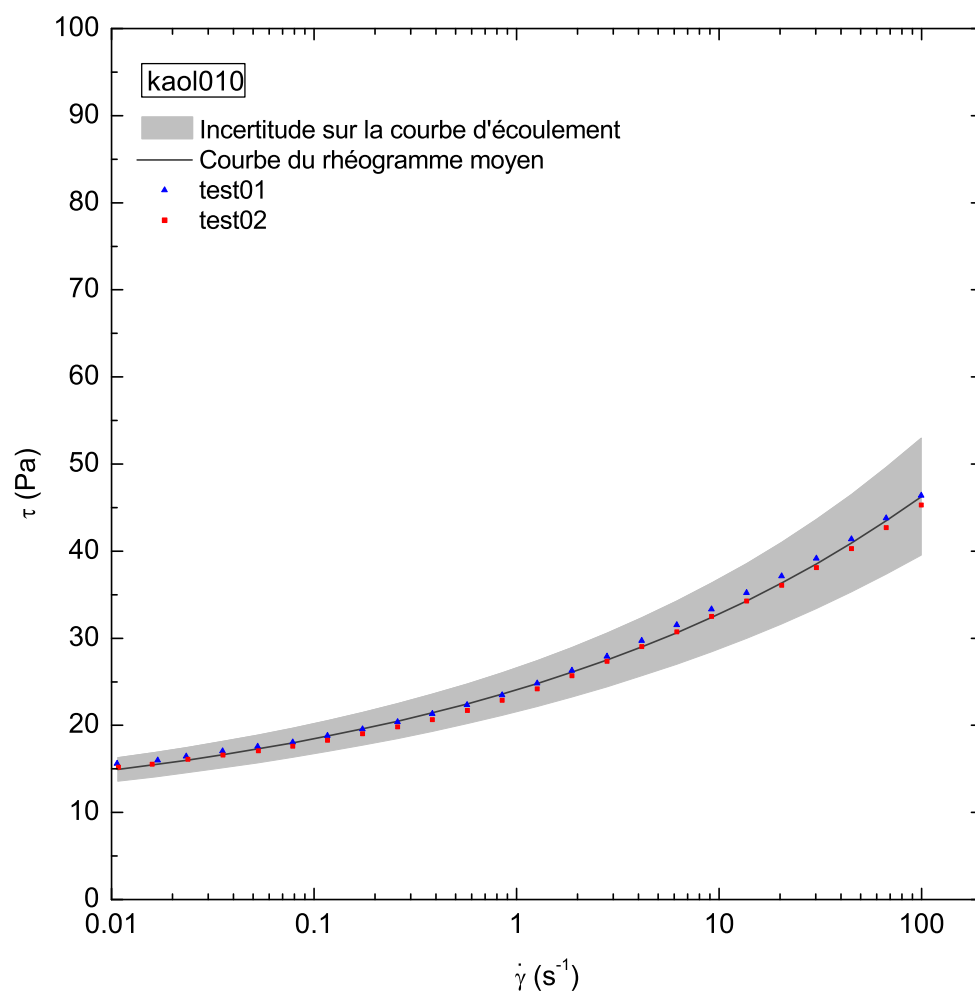


FIGURE B.8 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol010*.

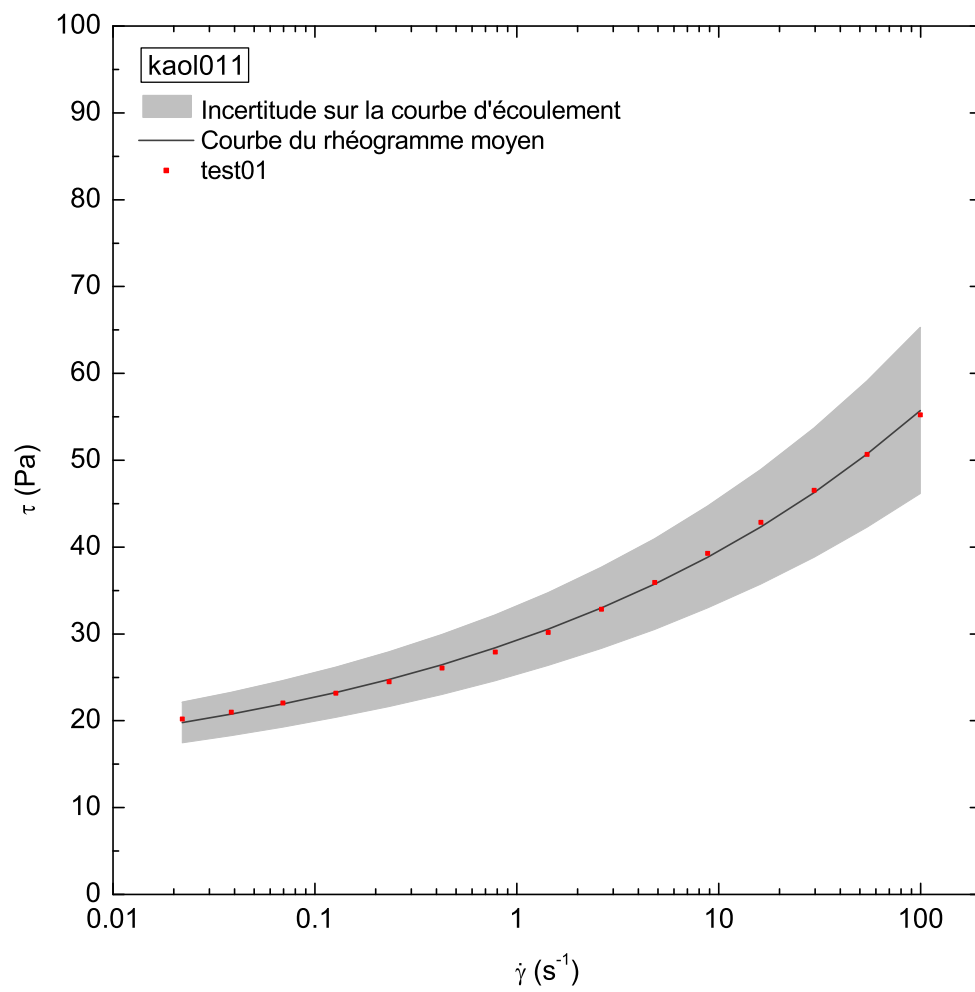


FIGURE B.9 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol011*.

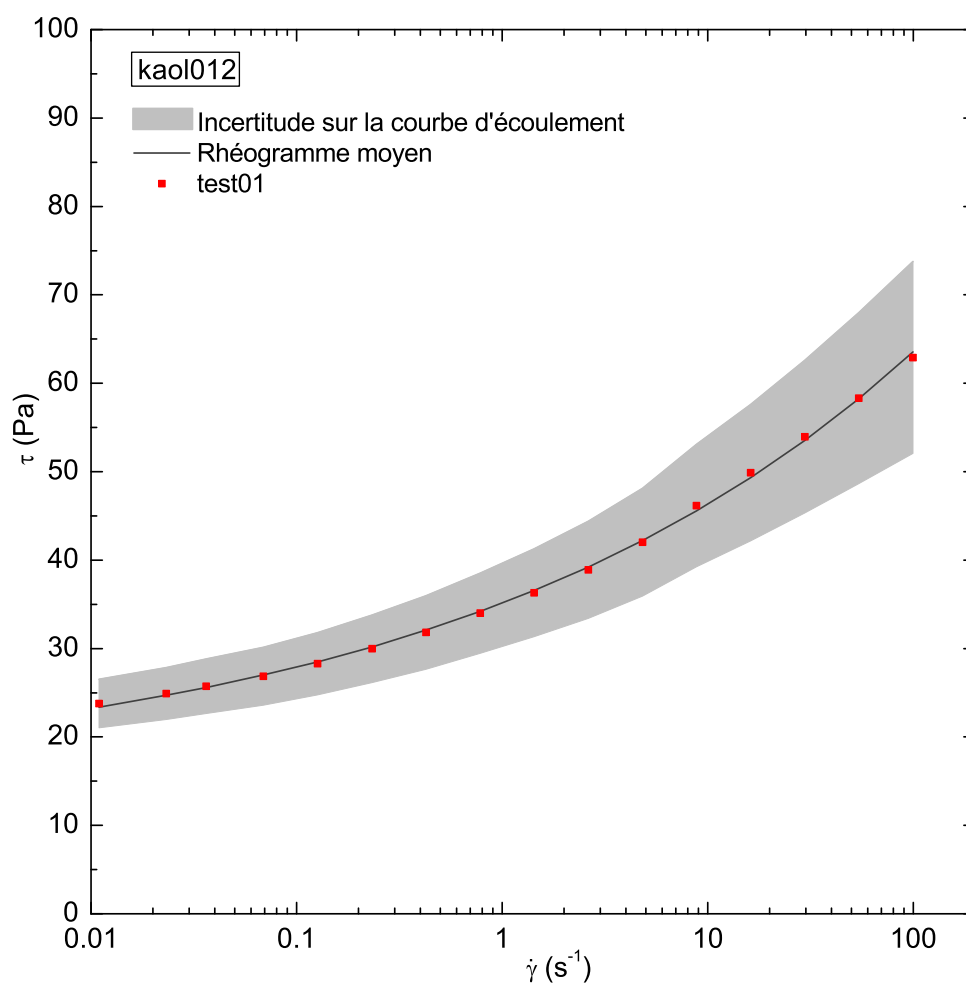


FIGURE B.10 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol012*.

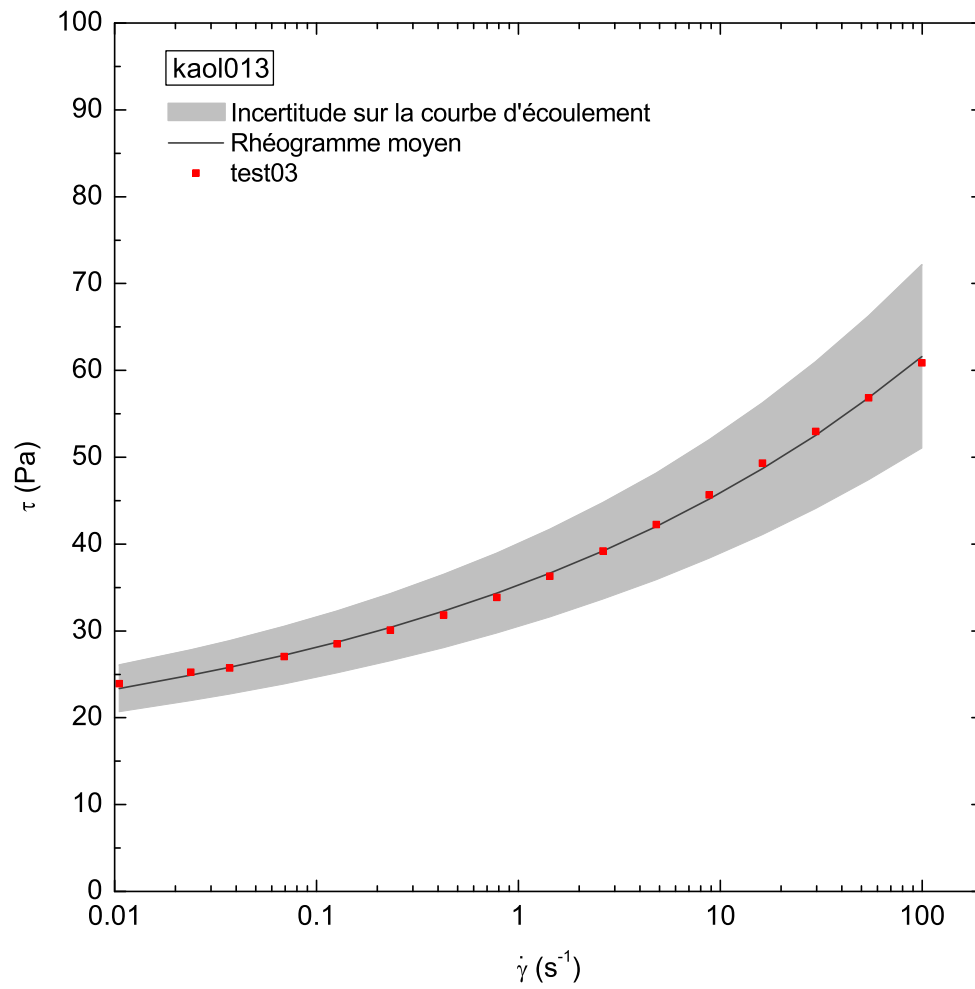


FIGURE B.11 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol013*.

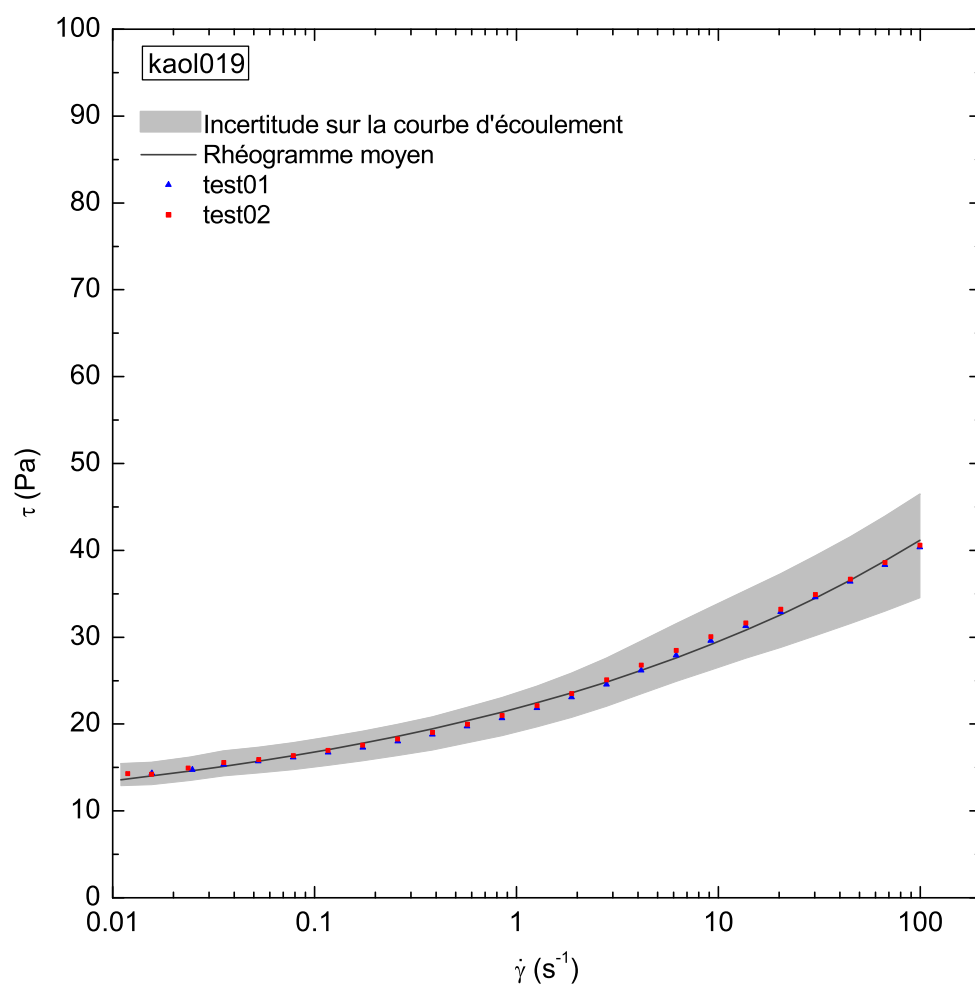


FIGURE B.12 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol019*.

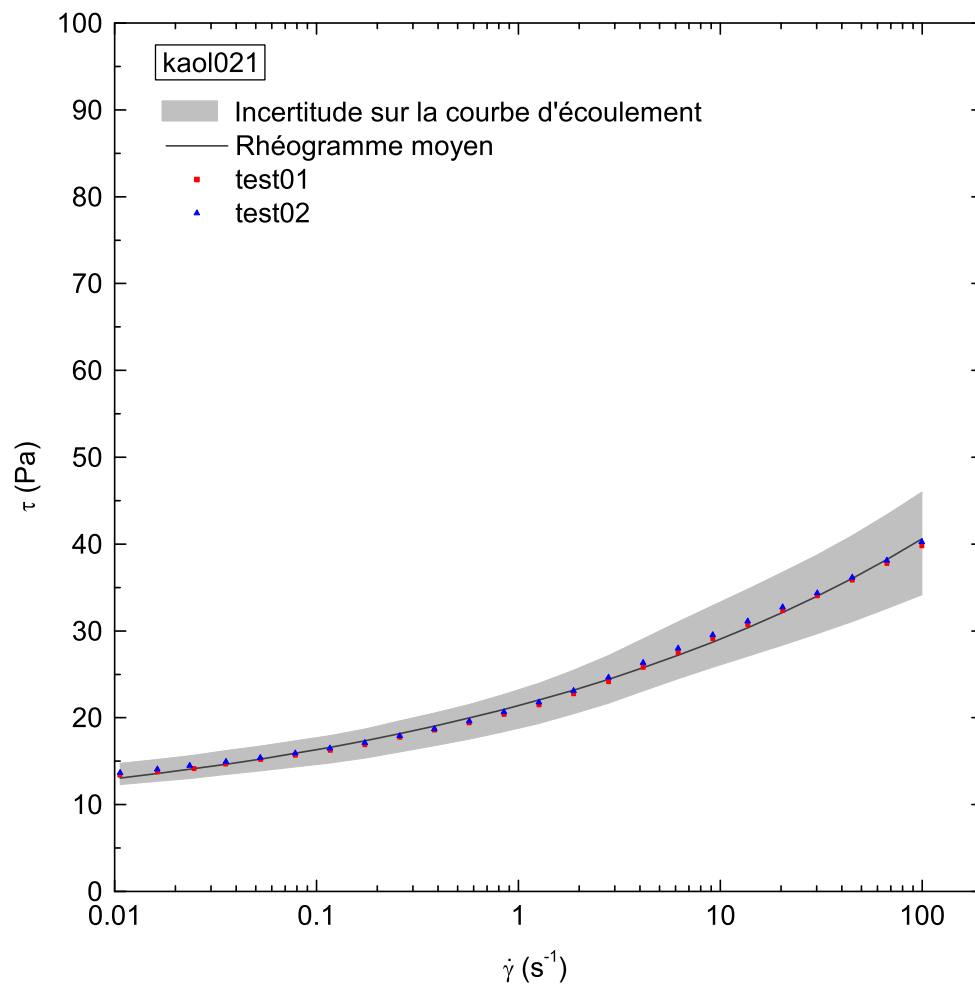


FIGURE B.13 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol021*.

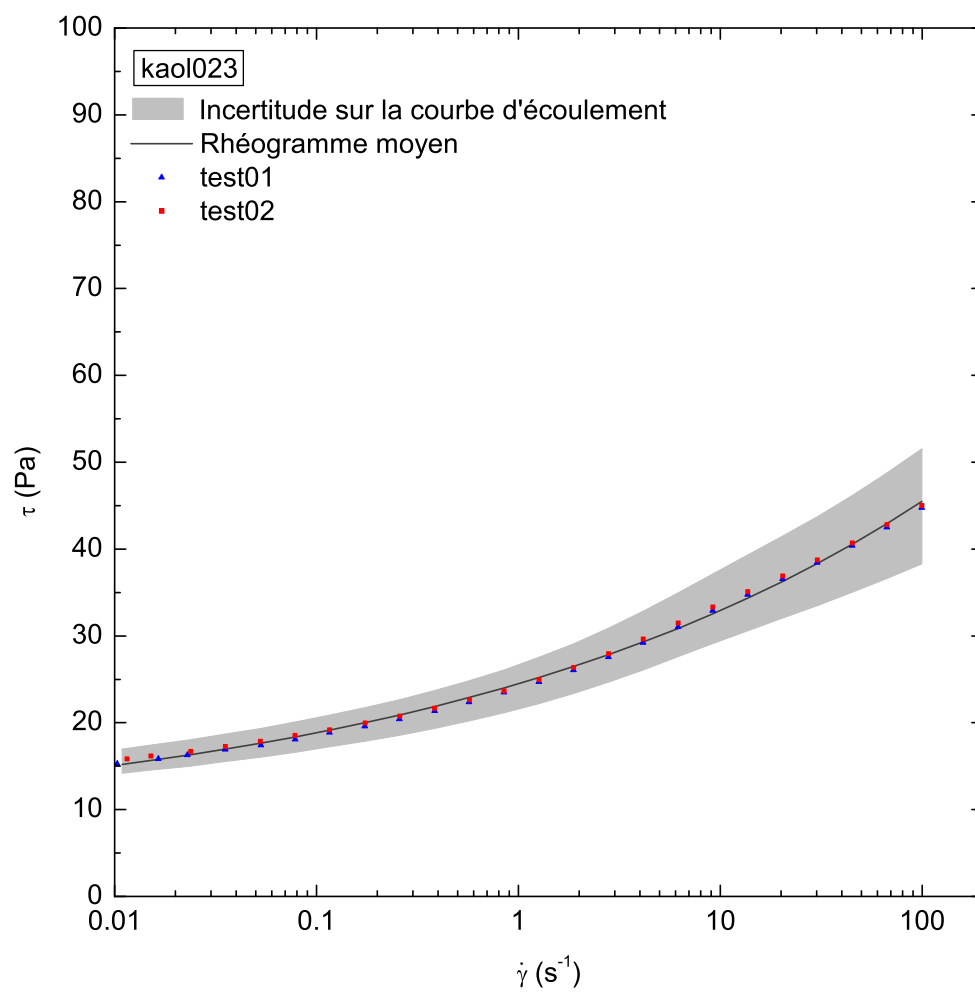


FIGURE B.14 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol023*.

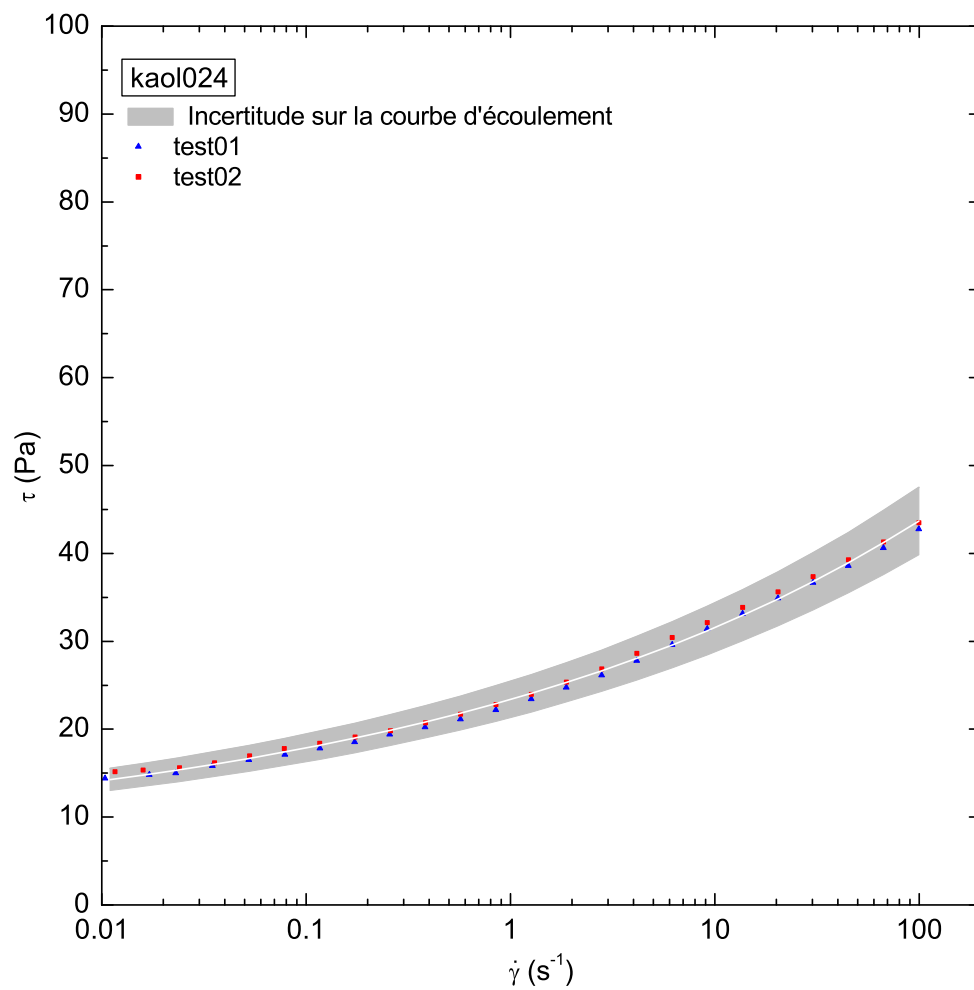


FIGURE B.15 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol024*.

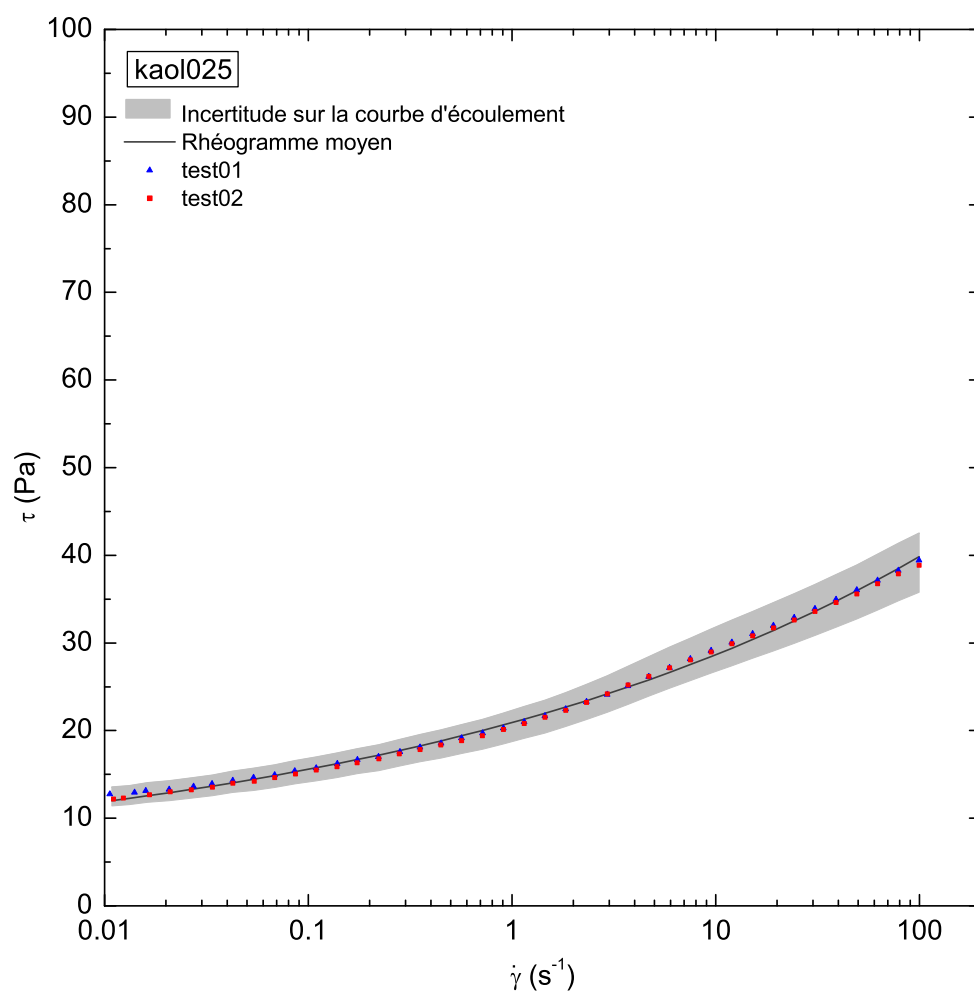


FIGURE B.16 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol025*.

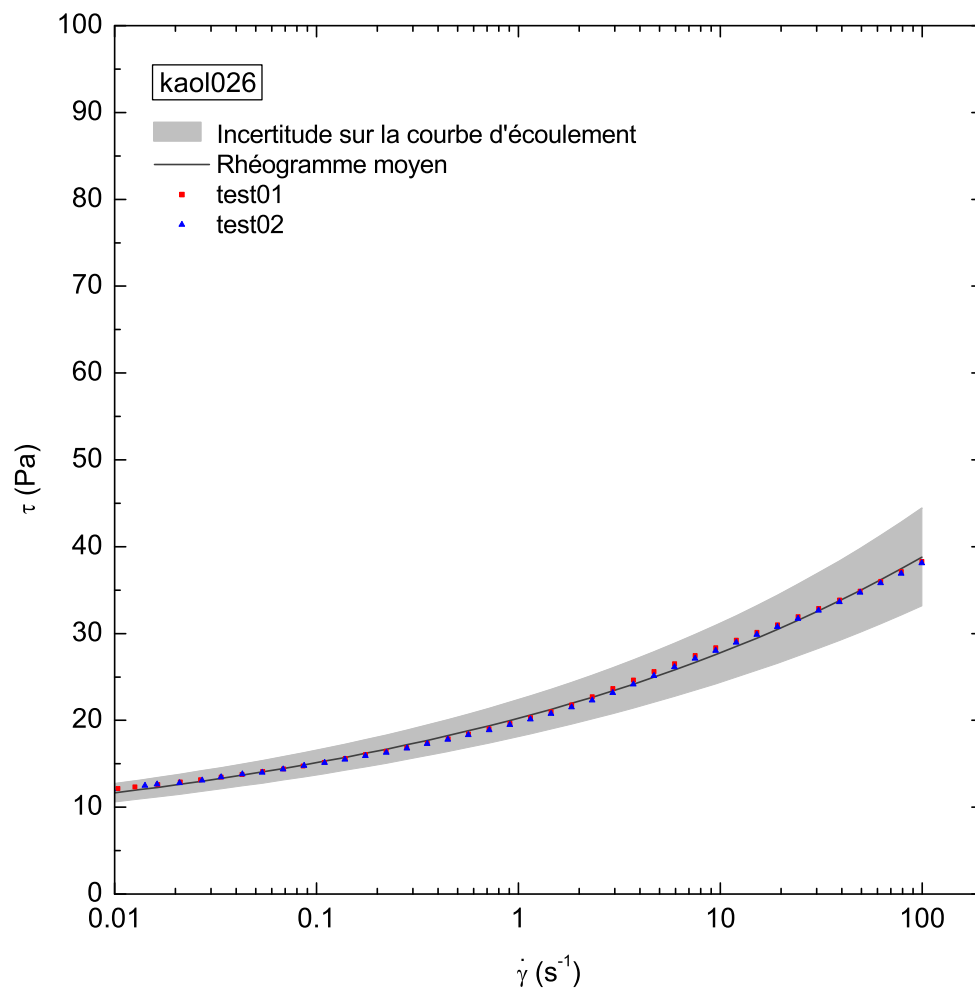


FIGURE B.17 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol026*.

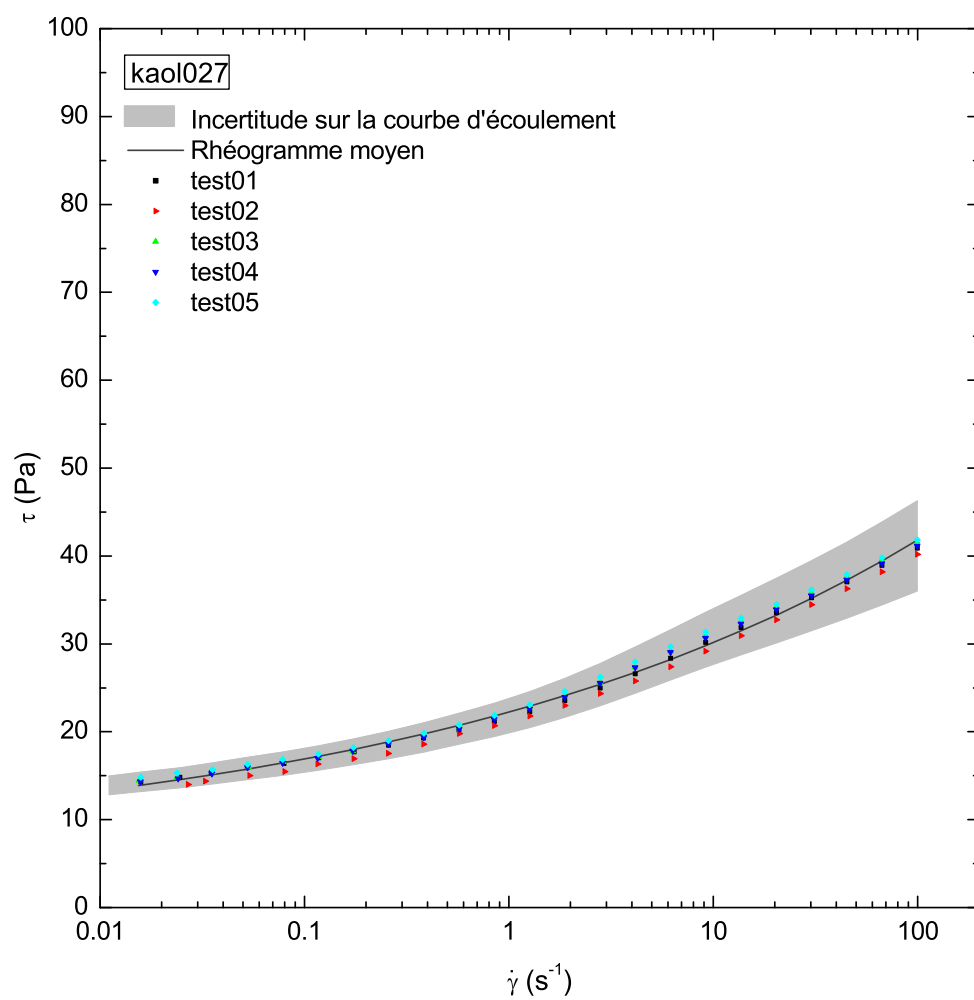


FIGURE B.18 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol027*

Annexe C

Paramètres d'ajustement : cas du carbopol

Rappels et notes :

- h est la taille de l'entrefer, ϕ est le diamètre de l'outil supérieur, T est la température de l'essai.
- La mention *av* et *ap* indique si le matériau a été échantillonné avant ou après l'essai sur le canal.
- **moy** désigne la courbe du rhéogramme moyen, **sup** et **inf** désignent respectivement la courbe supérieure et inférieure du domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement.
- *r1* et *r2* désignent les essais et leurs répétitions. Dans le cas du carbopol, on ne présente que les paramètres des essais de répétition *r2*. Dans le cas particulier du carbopol *carb000*, nous présentons les essais *r1* et *r2* mais nous précisons que les courbes *moy* (*r2*), *inf* (*r2*) et *sup* (*r2*) sont déterminées pour essais de répétition *r2* uniquement.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T $^{\circ}\text{C}$	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01 r1	1000	60	20	8.52	7.39	0.415
test01 r2	1000	60	20	8.49	7.18	0.421
test02 r1	1000	60	20	7.81	6.94	0.417
test02 r2	1000	60	20	7.81	6.72	0.423
test03 r1	1000	60	20	7.84	6.89	0.418
test03 r2	1000	60	20	7.83	6.68	0.423
test04 r1	1000	60	20	8.00	7.10	0.416
tets04 r2	1000	60	20	7.99	6.88	0.423
test05 r1	1000	60	20	7.97	7.10	0.416
test05 r2	1000	60	20	7.96	6.85	0.423
test06 r1	1000	60	20	7.90	7.04	0.416
test06 r2	1000	60	20	7.92	6.87	0.422
test07 r1	1500	60	20	7.91	7.24	0.422
test07 r2	1500	60	20	7.90	7.06	0.427
test08 r1	1500	60	20	7.90	7.25	0.422
test08 r2	1500	60	20	7.90	7.07	0.428
test09 r1	1500	60	20	7.84	7.02	0.424
test09 r2	1500	60	20	7.80	6.86	0.427
test10 r1	1000	40	20	8.13	7.40	0.419
test10 r2	1000	40	20	8.06	7.18	0.422
test11 r1	1000	40	20	8.12	7.34	0.417
test11 r2	1000	40	20	8.10	7.07	0.424
test12 r1	1000	40	20	8.20	7.42	0.417
test12 r2	1000	40	20	8.18	7.21	0.422
test13 r1	1000	60	20	8.07	7.23	0.417
test13 r2	1000	60	20	8.09	7.03	0.423
test14 r1	1000	60	20	8.08	7.12	0.418
test14 r2	1000	60	20	8.08	6.96	0.422
test15 r1	1000	60	20	8.12	7.22	0.417
test15 r2	1000	60	20	8.13	7.01	0.423
test16 r1	1000	60	20	8.05	7.20	0.416
test16 r2	1000	60	20	8.07	6.99	0.423
test17 r1	1500	40	20	8.37	7.78	0.423
test17 r2	1500	40	20	8.34	7.63	0.426
test18 r1	1500	40	20	8.39	7.92	0.424
test18 r2	1500	40	20	8.44	7.74	0.428
test19 r1	1500	40	20	8.25	7.67	0.423
test19 r2	1500	40	20	8.22	7.48	0.427
			<i>moy</i> (r2)	8.07	7.09	0.424
			<i>sup</i> (r2)	8.61	7.67	0.430
			<i>inf</i> (r2)	7.53	6.51	0.416

TABLE C.1 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb000*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test06	60	1000	25	18.64	10.04	0.390
test07	60	1000	25	18.22	9.75	0.391
			moy	18.43	9.89	0.390
			sup	20.07	11.18	0.397
			inf	16.79	8.61	0.382

TABLE C.2 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb001a*.

Test	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	40	1000	20	8.29	6.11	0.427
test02	60	1000	20	7.92	6.04	0.417
			moy	8.11	6.08	0.422
			sup	8.84	6.80	0.429
			inf	7.37	5.36	0.412

TABLE C.3 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb002b*.

Test av	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	40	1000	25	23.77	12.95	0.386
test02	60	1000	25	22.53	12.19	0.387
			moy	23.15	12.57	0.387
			sup	25.21	14.21	0.393
			inf	21.09	10.94	0.378

TABLE C.4 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb003a av*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test04	60	1000	25	18.25	10.32	0.385
			moy	18.25	10.32	0.385
			sup	19.87	11.66	0.391
			inf	16.62	9.00	0.376

TABLE C.5 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb003a ap*.

Test av	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	40	1000	25	22.45	11.73	0.392
test02	60	1000	25	22.03	11.39	0.382
			moy	22.24	11.56	0.387
			sup	24.21	13.08	0.394
			inf	20.25	10.05	0.379

TABLE C.6 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb006a av*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test03	40	1000	25	19.89	10.60	0.393
test04	60	1000	25	20.60	11.43	0.375
			moy	20.25	11.02	0.384
			sup	22.07	12.42	0.390
			inf	18.44	9.60	0.375

TABLE C.7 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb006a ap*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	40	1000	16.5	19.98	10.85	0.399
test02	60	1000	16.5	21.59	11.86	0.384
test03	40	2000	16.5	21.00	11.21	0.411
test04	60	2000	16.5	21.58	12.04	0.395
test05	40	1000	25	20.80	10.77	0.393
test06	60	2000	25	20.48	11.93	0.381
test07	40	2000	25	21.33	10.81	0.407
test08	60	1000	25	19.75	11.80	0.371
			moy	20.82	11.40	0.393
			sup	22.30	12.55	0.398
			inf	19.34	10.25	0.3857042

TABLE C.8 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb007*.

Test av	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
Test01	40	2000	25	18.19	8.05	0.418
Test02	60	2000	25	18.67	9.00	0.405
			moy	18.36	8.52	0.412
			sup	20.13	9.50	0.421
			inf	16.58	7.56	0.399

TABLE C.9 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb008a av*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test03	40	2000	25	17.76	7.96	0.417
test04	60	2000	25	17.96	8.54	0.408
			moy	17.84	8.25	0.412
			sup	19.55	9.18	0.422
			inf	16.12	7.33	0.399

TABLE C.10 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol *carb008a ap*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T $^{\circ}\text{C}$	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01ap	60	1000	25	14.08	9.23	0.371
test02ap	60	2000	25	15.16	10.21	0.376
			moy	14.62	9.72	0.374
			sup	15.94	10.98	0.381
			inf	13.30	8.46	0.364

TABLE C.11 – Tableau récapitulatif des paramètres d’ajustement pour le carbopol *carb009a ap*.

Test av	h (μm)	ϕ (mm)	T $^{\circ}\text{C}$	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test20	60.00	1000	25	15.44	10.28	0.381
			moy	15.44	10.28	0.381
			sup	17.07	11.77	0.389
			inf	13.80	8.81	0.369

TABLE C.12 – Tableau récapitulatif des paramètres d’ajustement pour le carbopol *carb010b av*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T $^{\circ}\text{C}$	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test14ap	60	1000	25	14.35	9.53	0.386
			moy	14.35	9.53	0.386
			sup	15.86	10.90	0.394
			inf	12.82	8.17	0.374

TABLE C.13 – Tableau récapitulatif des paramètres d’ajustement pour le carbopol *carb010b ap*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T $^{\circ}\text{C}$	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01	60	1500	25	7.07	6.33	0.393
test02	60	2000	25	7.04	6.37	0.395
test03	40	1500	25	7.04	6.07	0.399
			moy	7.05	6.26	0.396
			sup	7.65	6.92	0.403
			inf	6.44	5.60	0.386

TABLE C.14 – Tableau récapitulatif des paramètres d’ajustement pour le carbopol *carb011*.

Annexe D

Paramètres d'ajustement : cas du kaolin

Rappels et notes :

- h est la taille de l'entrefer, ϕ est le diamètre de l'outil supérieur, T est la température de l'essai.
- La mention *ap* indique que le matériau a été échantillonné après l'essai sur le canal. Dans le cas du kaolin, toutes les expériences ont été réalisées sur des échantillons collectés après essai sur le canal
- **moy** désigne la courbe du rhéogramme moyen, **sup** et **inf** désignent respectivement la courbe supérieure et inférieure du domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement, pour les premiers essais de rhéométrie *r1*. Dans le cas du kaolin, nous n'avons pas réalisé de répétitions *r2*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T °C	τ_c (Pa)	k (Pa.s ^{n})	n
test01	PP60	1500	25	15.00	17.33	0.200
test03	PP60	1500	25	13.78	17.48	0.196
			moy	14.39	17.41	0.20
			sup	16.05	19.07	0.21
			inf	12.56	15.91	0.18

TABLE D.1 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol002*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	20	16.60	20.31	0.197
			moy	16.46	20.45	0.196
			sup	18.73	22.70	0.209
			inf	13.89	18.51	0.175

TABLE D.2 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol003*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	17.5	9.40	16.49	0.187
test02	PP60	2000	17.5	9.65	17.41	0.185
			moy	9.53	16.95	0.186
			sup	10.36	18.44	0.186
			inf	8.69	15.46	0.186

TABLE D.3 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol004*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	16	11.55	20.70	0.180
test02	PP60	2000	16	12.36	19.94	0.184
			moy	11.95	20.32	0.182
			sup	13.65	21.99	0.195
			inf	9.97	18.94	0.165

TABLE D.4 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol005*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	17	14.62	20.14	0.192
test02	PP60	2000	17	15.30	19.37	0.197
			moy	14.96	19.76	0.194
			sup	16.75	21.60	0.206
			inf	12.95	18.13	0.178

TABLE D.5 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol007*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test03	PP60	1500	17	21.59	25.21	0.191
			moy	21.59	25.21	0.191
			sup	24.65	27.87	0.205
			inf	18.04	23.04	0.169

TABLE D.6 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol008*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01	PP60	1500	15	2.69	11.90	0.179
test02	PP60	1500	15	2.84	11.47	0.182
test03	PP60	1000	15	3.57	10.45	0.195
				moy	3.05	11.26
				sup	3.60	12.08
				inf	2.39	10.53
						0.171

TABLE D.7 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol009*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01	PP60	1500	15	8.34	16.06	0.190
test02	PP60	2000	15	8.14	15.63	0.190
				moy	8.24	15.84
				sup	9.38	17.23
				inf	6.94	14.63
						0.174

TABLE D.8 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol010*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01 : <i>kaol011</i>	PP60	1500	18	11.39	17.85	0.198
				moy	11.39	17.85
				sup	12.85	20.34
				inf	9.84	15.45
test02 : <i>kaol012</i>	PP60	1500	18	14.70	20.43	0.190
				moy	14.70	20.43
				sup	16.52	23.34
				inf	12.76	17.62
test03 : <i>kaol013</i>	PP60	1500	18	13.34	21.92	0.172
				moy	13.34	21.92
				sup	15.10	24.92
				inf	11.42	19.08
						0.159

TABLE D.9 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol011*, *kaol012* et *kaol013*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500		7.62	14.01	0.189
test02	PP60	2000		6.84	15.16	0.178
			moy	7.24	14.57	0.184
			sup	8.25	15.85	0.195
			inf	6.07	13.45	0.168

TABLE D.10 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol019*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	18	6.34	14.90	0.180
test02	PP60	2000	18	6.41	15.15	0.178
			moy	6.37	15.02	0.179
			sup	7.37	16.27	0.191
			inf	5.20	13.96	0.163

TABLE D.11 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol021*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	22	8.96	18.91	0.172
test02	PP60	2000	22	8.55	19.60	0.168
			moy	8.76	19.25	0.170
			sup	10.22	20.72	0.183
			inf	6.97	18.11	0.152

TABLE D.12 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol022*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	22	7.23	17.08	0.174
test02	PP60	2000	22	7.68	16.98	0.175
			moy	7.45	17.03	0.175
			sup	8.65	18.40	0.187
			inf	6.03	15.89	0.158

TABLE D.13 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol023*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s^n)	n
test01	PP60	1500	22	6.36	16.72	0.172
test02	PP60	2000	22	6.57	17.11	0.170
			moy	6.47	16.92	0.171
			sup	7.60	18.23	0.184
			inf	5.09	15.85	0.154

TABLE D.14 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol024*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01	PP60	1500	20	4.56	16.42	0.168
test02	PP60	2000	20	2.75	18.10	0.154
			moy	3.68	17.23	0.161
			sup	4.67	18.44	0.173
			inf	2.42	16.30	0.144

TABLE D.15 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol025*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01	PP60	1500	20	3.80	16.56	0.163
test02	PP60	2000	20	4.69	15.43	0.172
			moy	4.26	15.99	0.167
			sup	5.18	17.18	0.179
			inf	3.10	15.02	0.151

TABLE D.16 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol026*.

Test ap	h (μm)	ϕ (mm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n
test01	PP60	1500	25	6.77	15.30	0.179
test02	PP60	1000	25	5.49	15.83	0.174
test03	PP60	2000	25	5.61	16.91	0.168
test04	PP60	2500	25	5.19	17.21	0.164
test05	PP60	3000	25	5.56	17.36	0.164
			moy	5.73	16.51	0.170
			sup	6.14	17.70	0.170
			inf	5.32	15.33	0.170

TABLE D.17 – Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin *kaol027*.

Annexe E

Courbes vitesse–hauteur : cas du cabopol

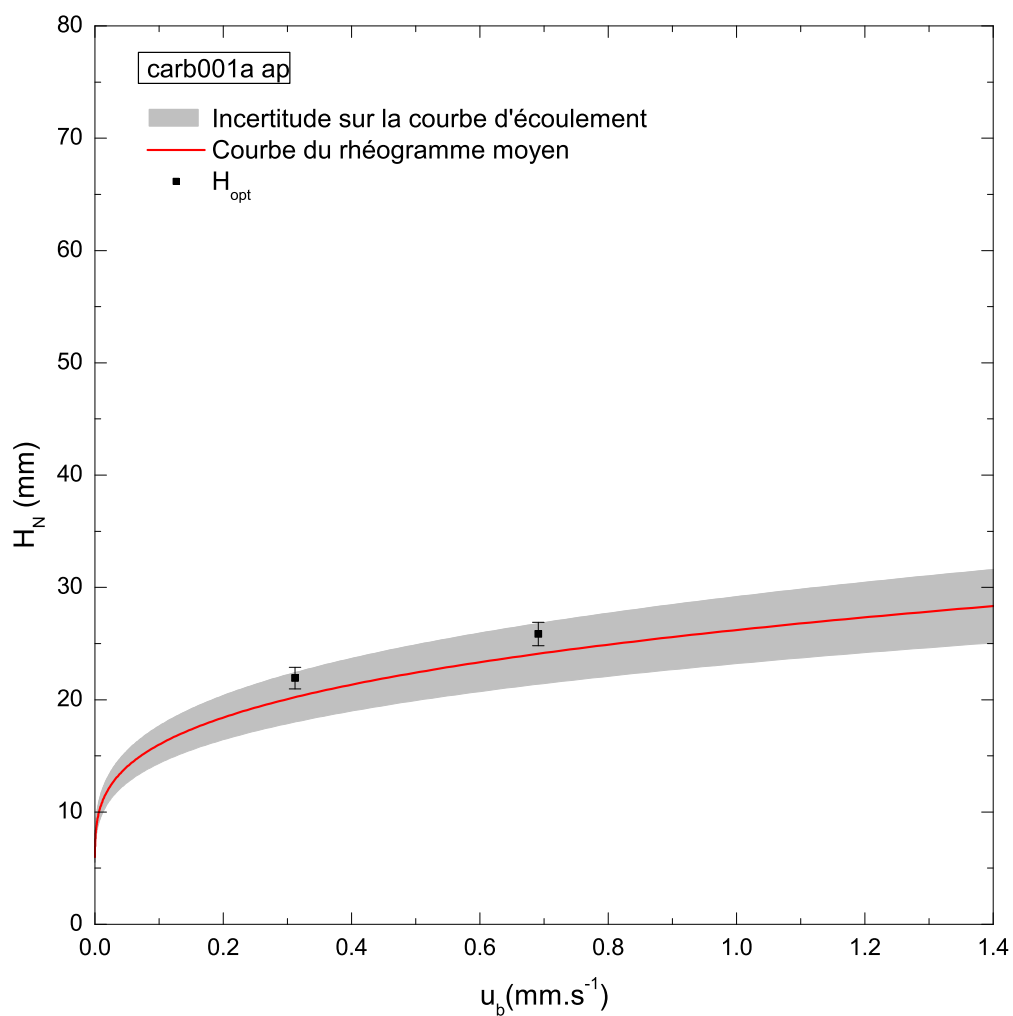


FIGURE E.1 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb001a*.

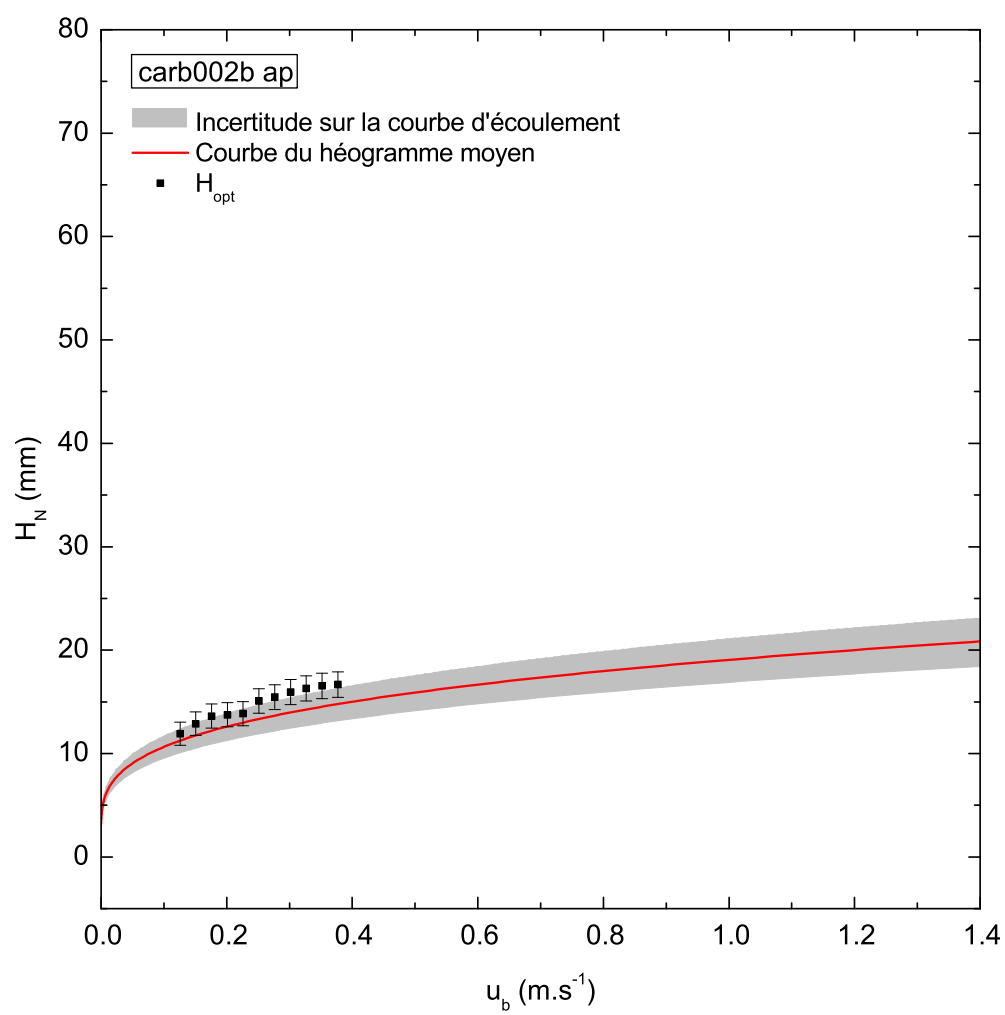


FIGURE E.2 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb002b*.

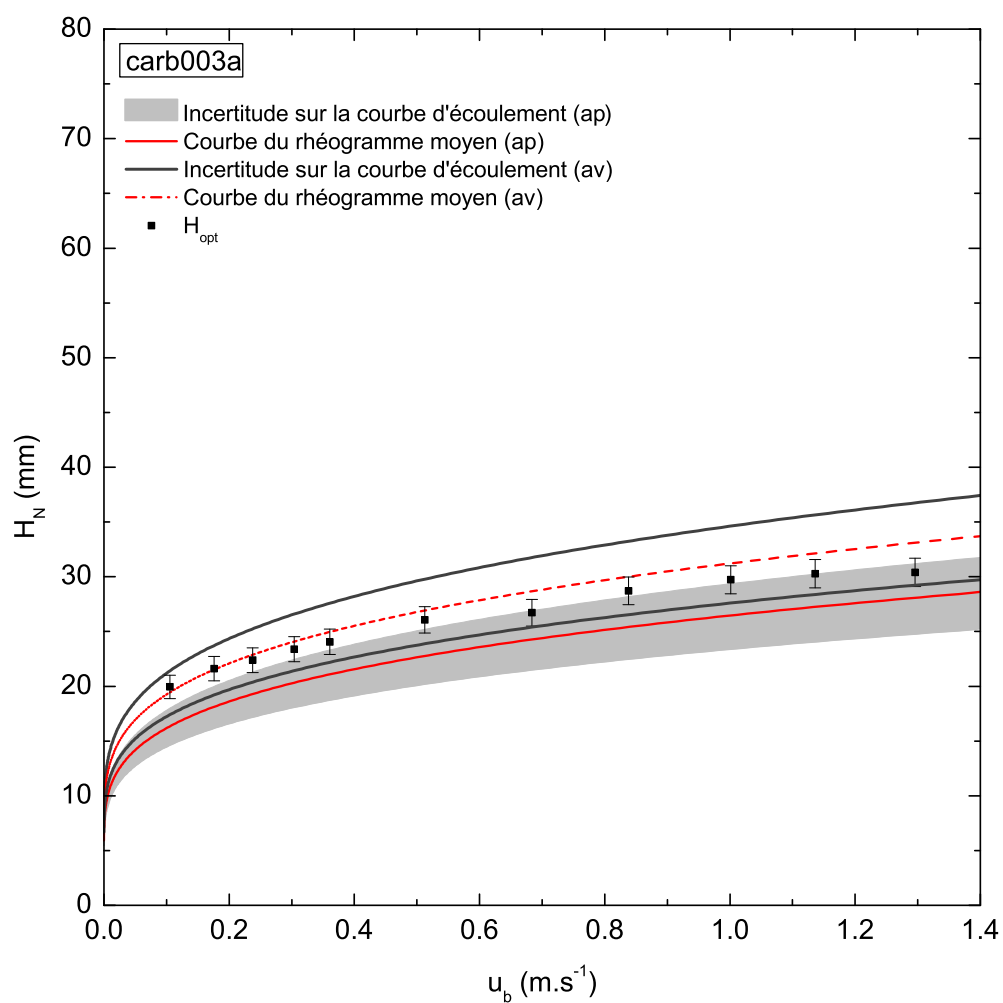


FIGURE E.3 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb003a*.

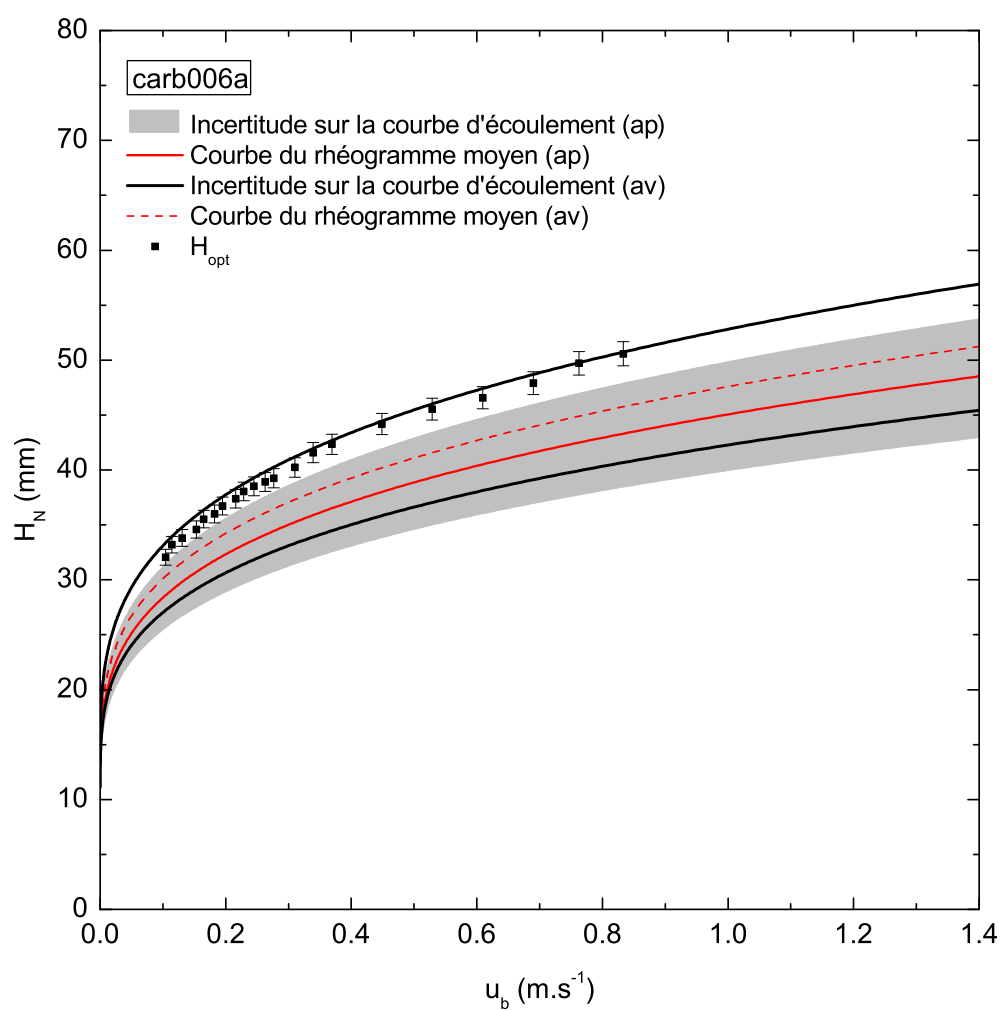


FIGURE E.4 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb006a*.

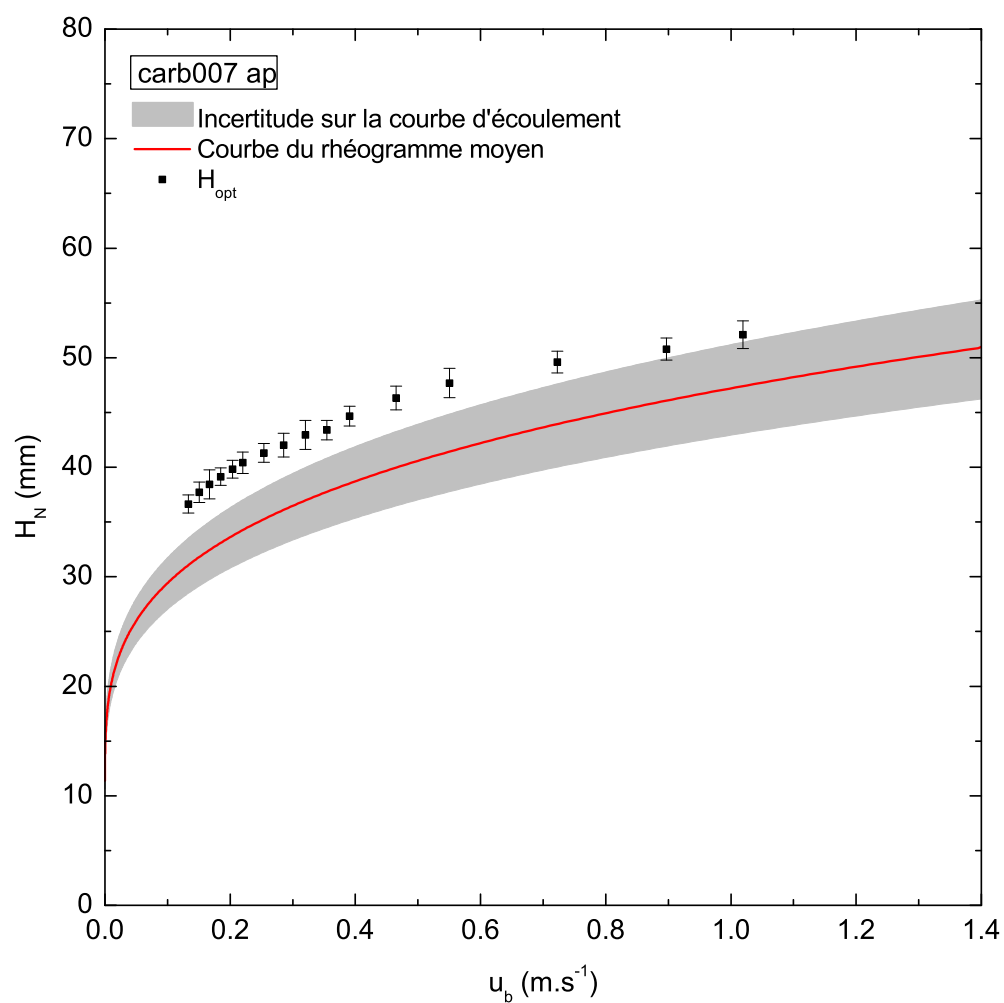


FIGURE E.5 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb007*.

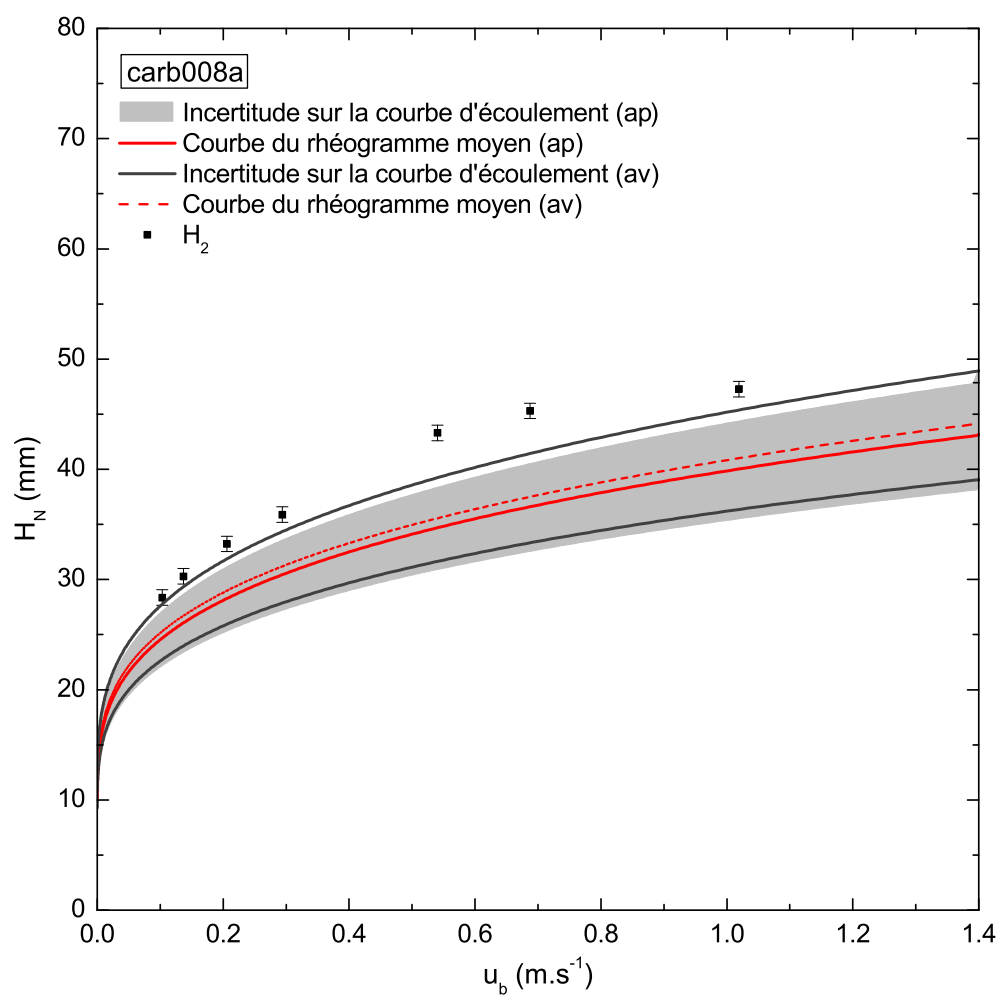


FIGURE E.6 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb008a*.

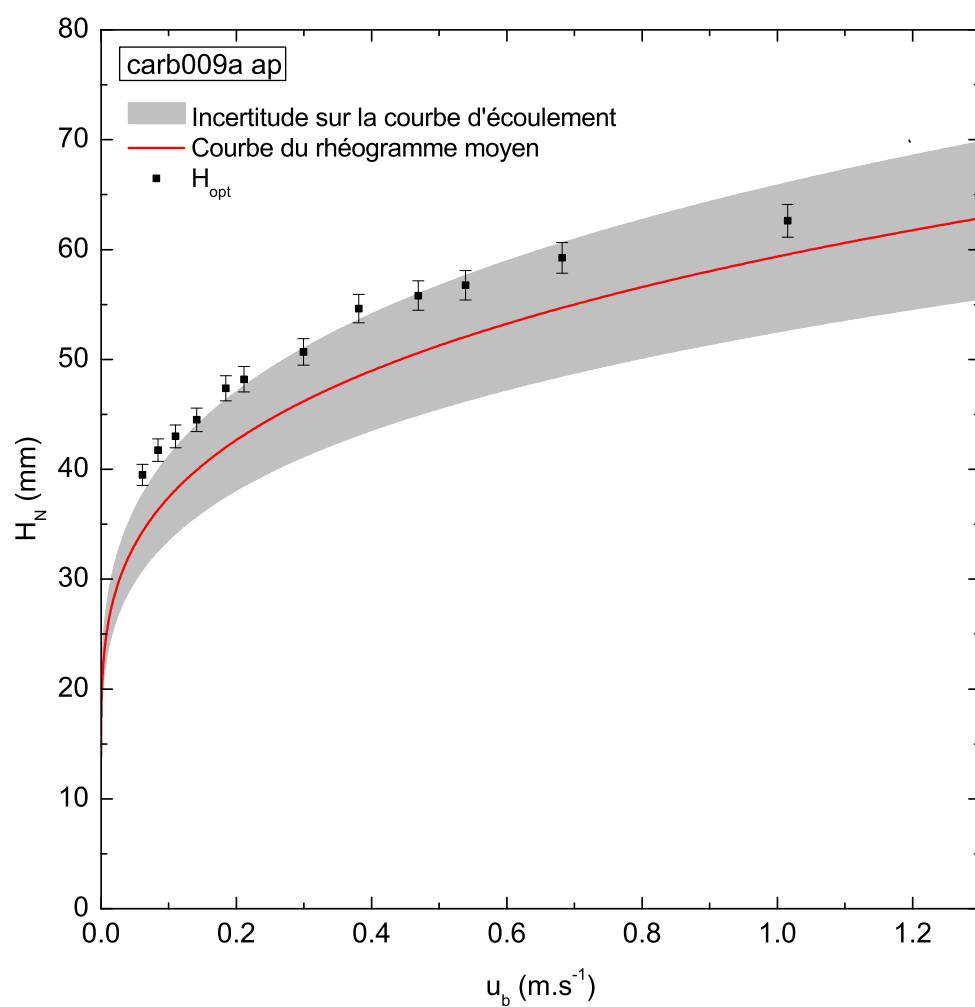


FIGURE E.7 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb009a*.

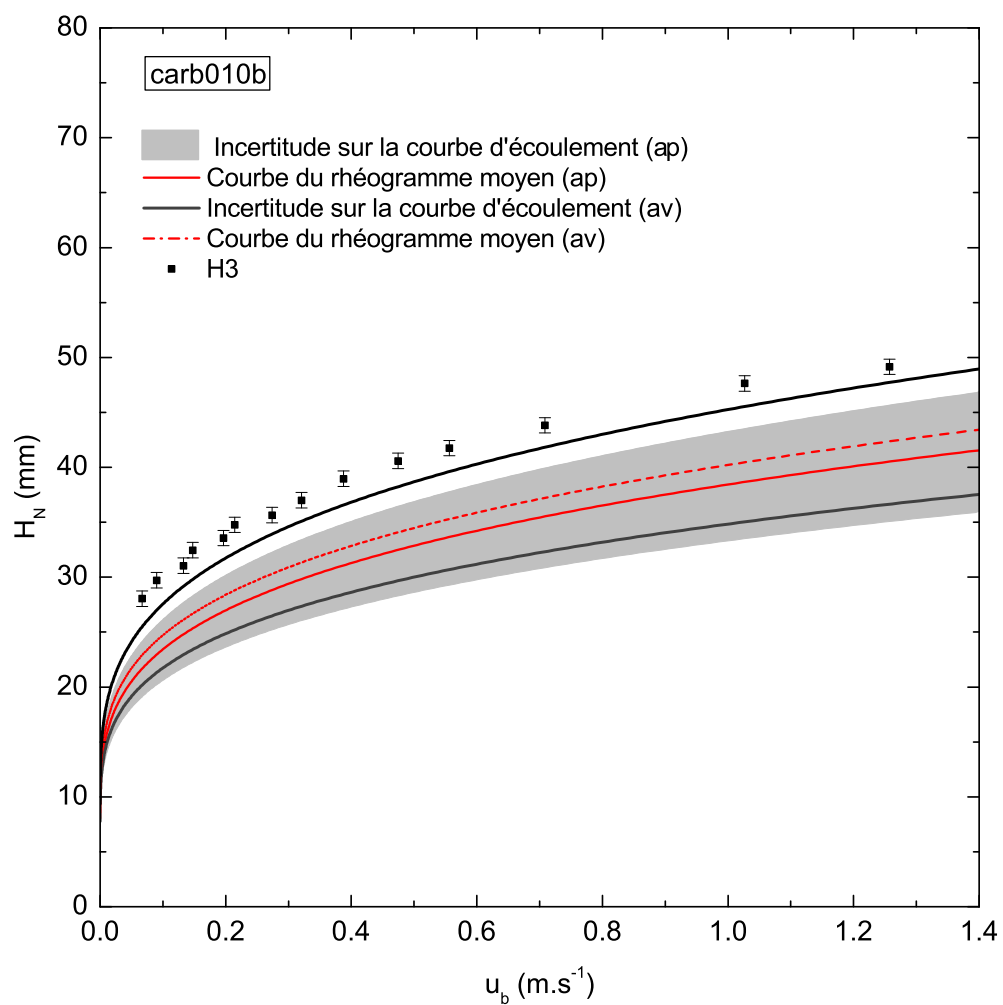


FIGURE E.8 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb010b*.

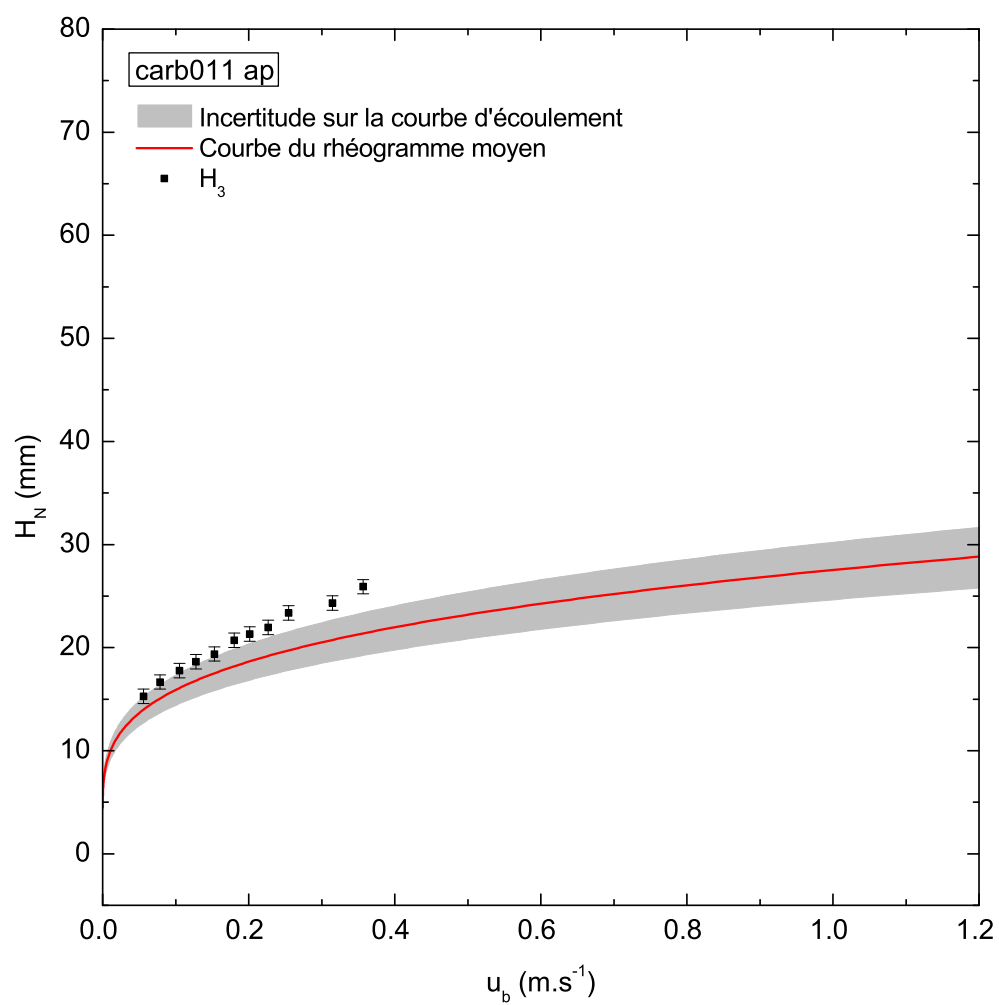


FIGURE E.9 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : *carb011*.

Annexe F

Courbes vitesse–hauteur : cas du kaolin

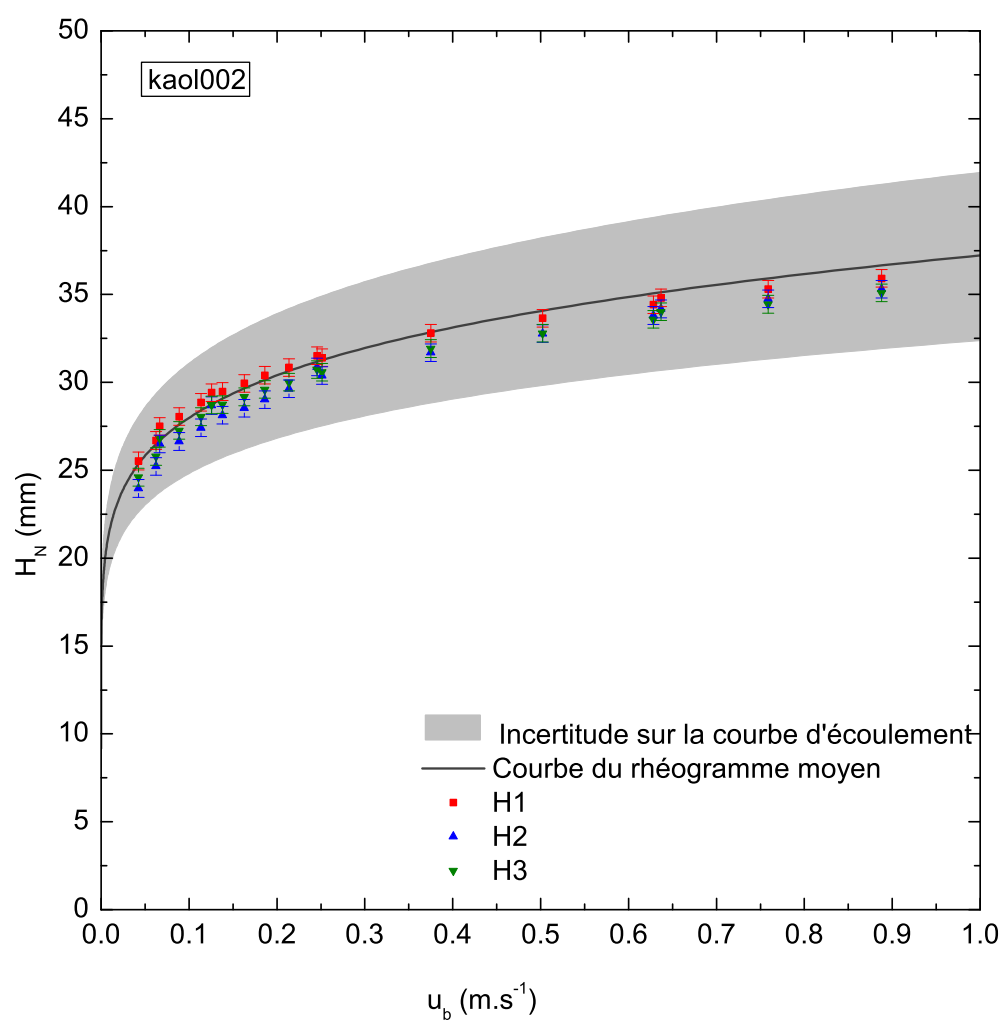


FIGURE F.1 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol002*.

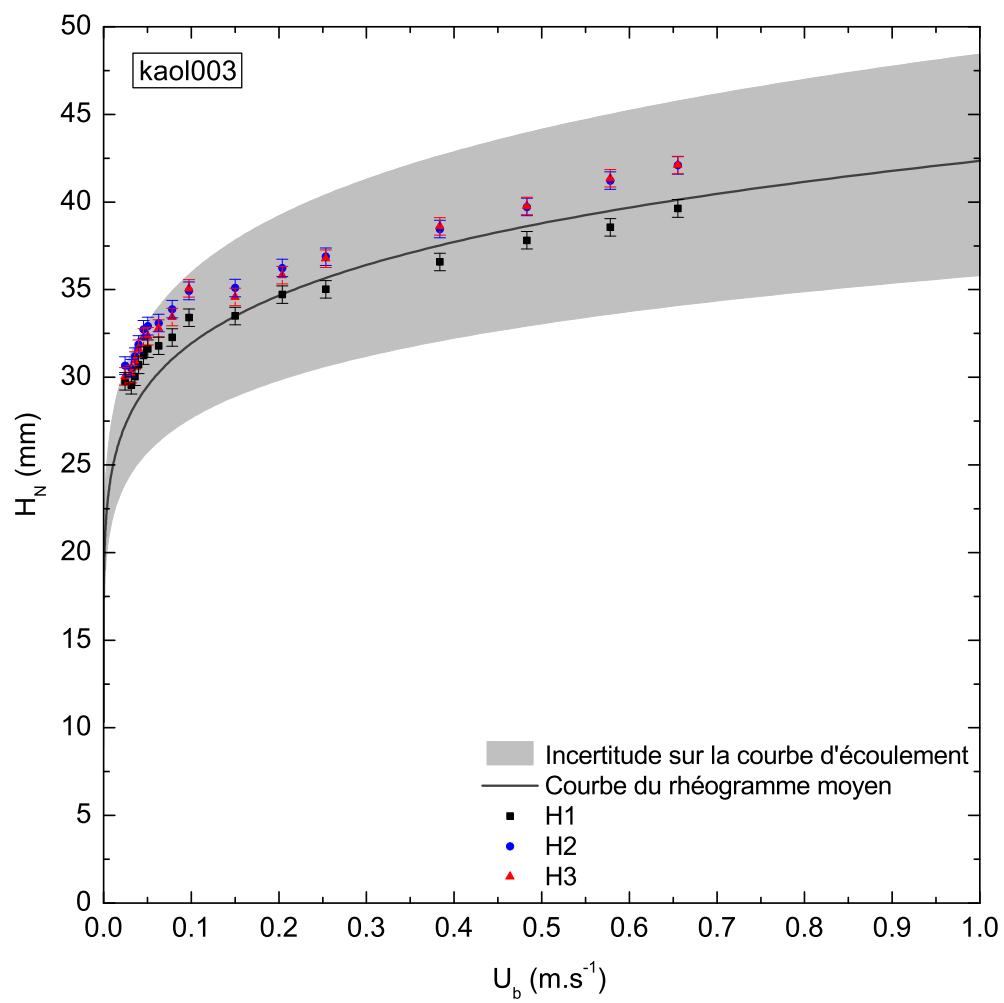


FIGURE F.2 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol003*.

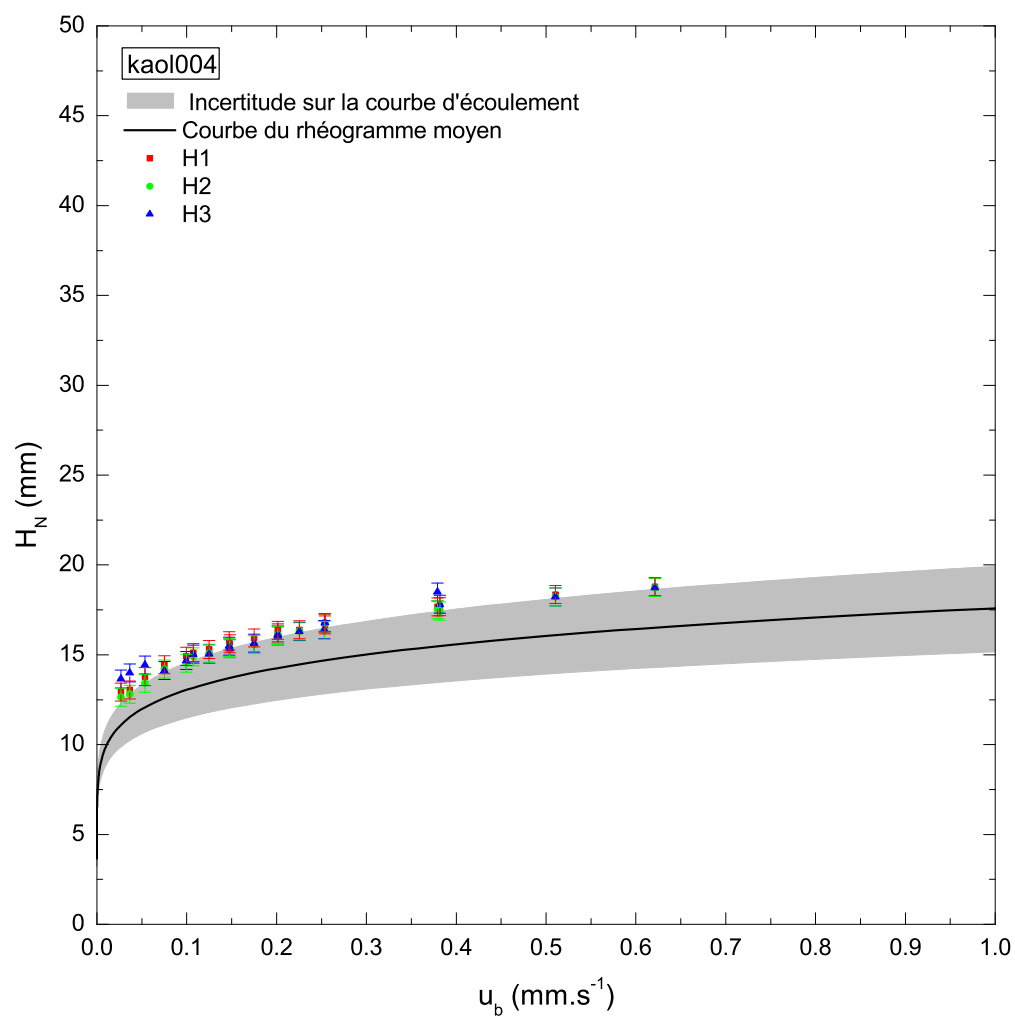


FIGURE F.3 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol004*.

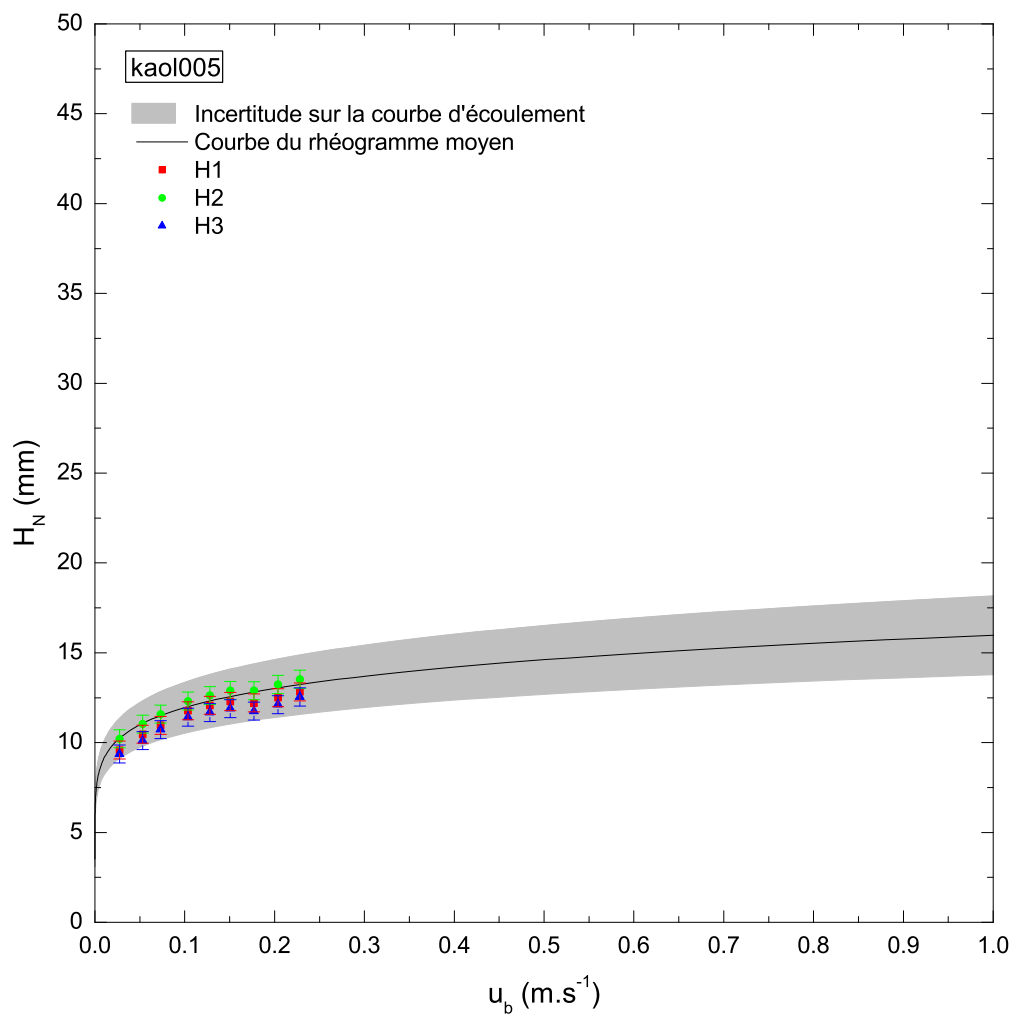


FIGURE F.4 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol005*.

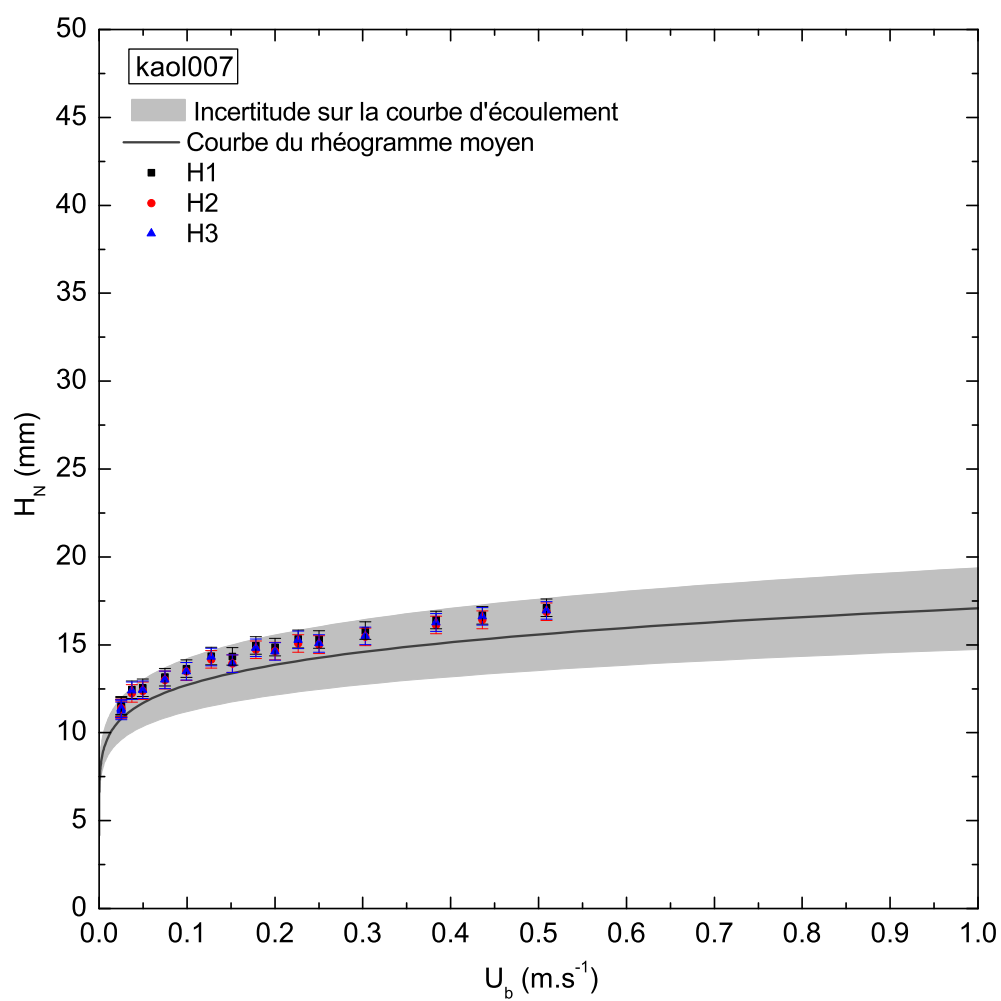


FIGURE F.5 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol007*.

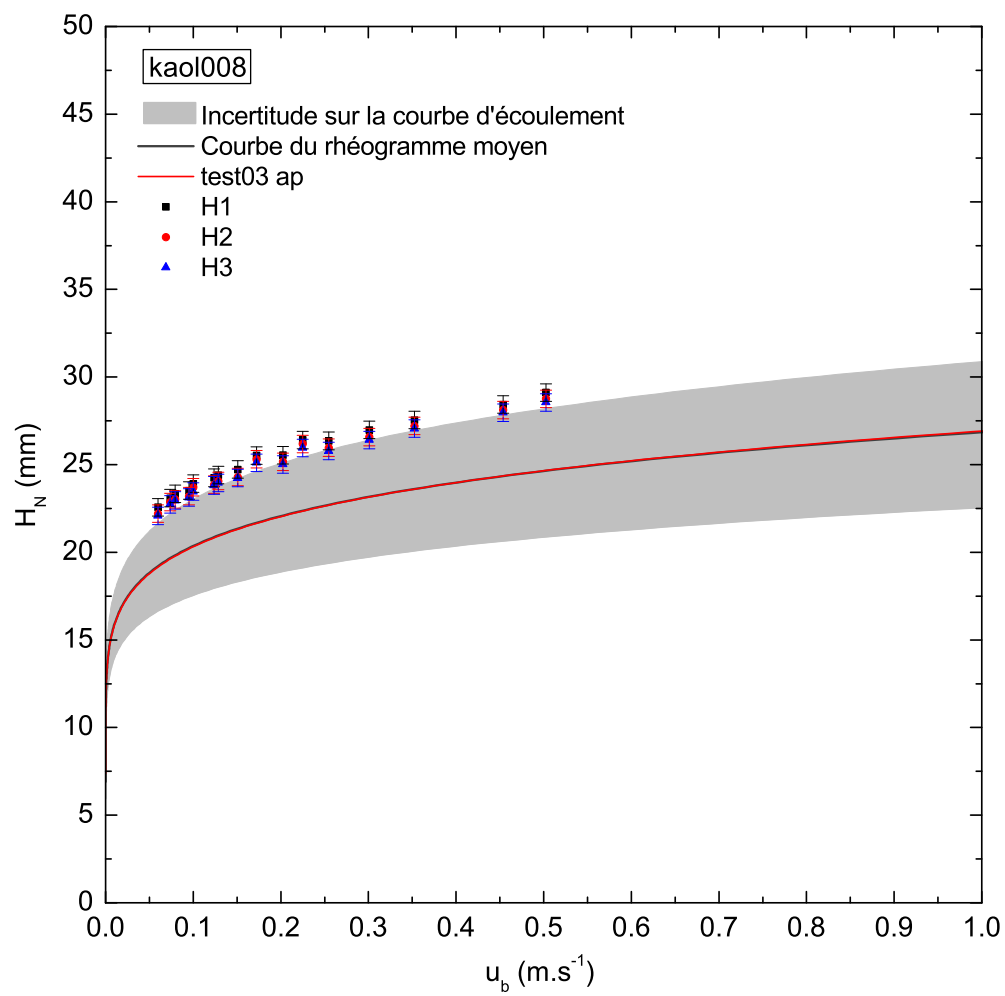


FIGURE F.6 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol008*.

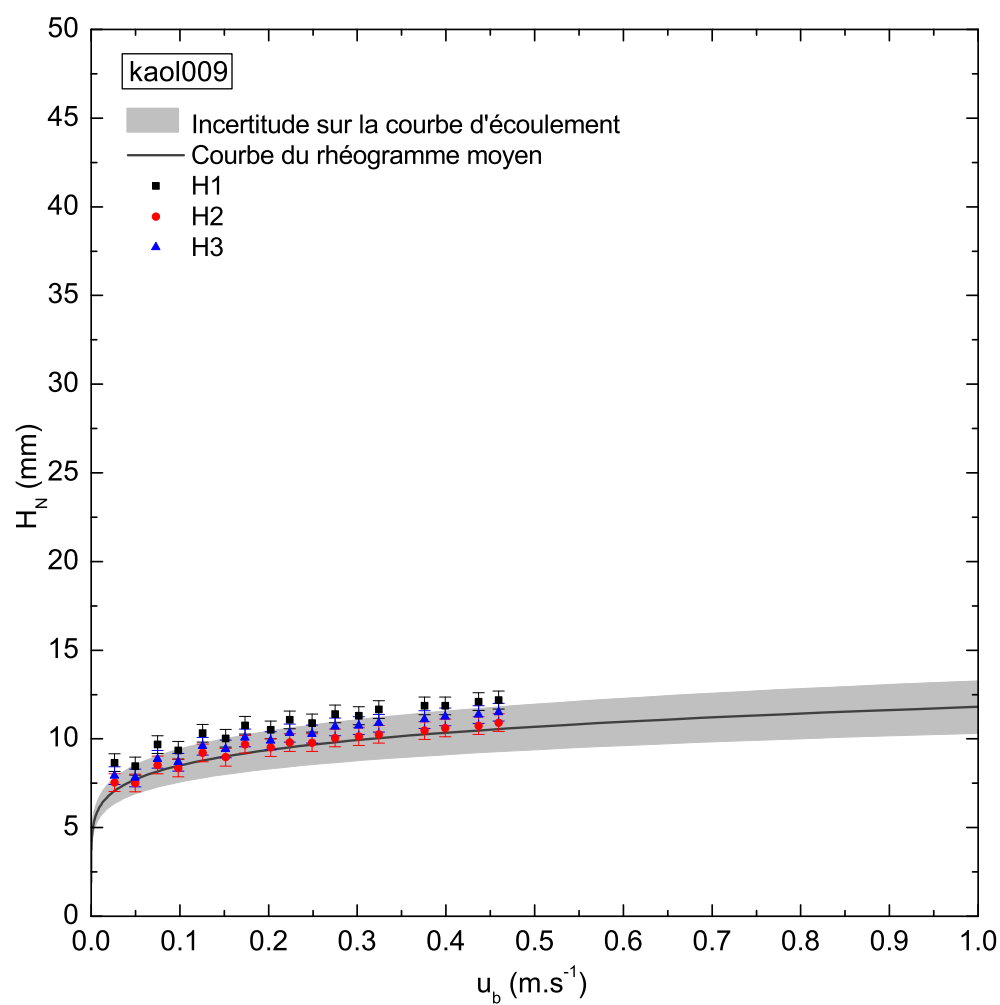


FIGURE F.7 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol009*.

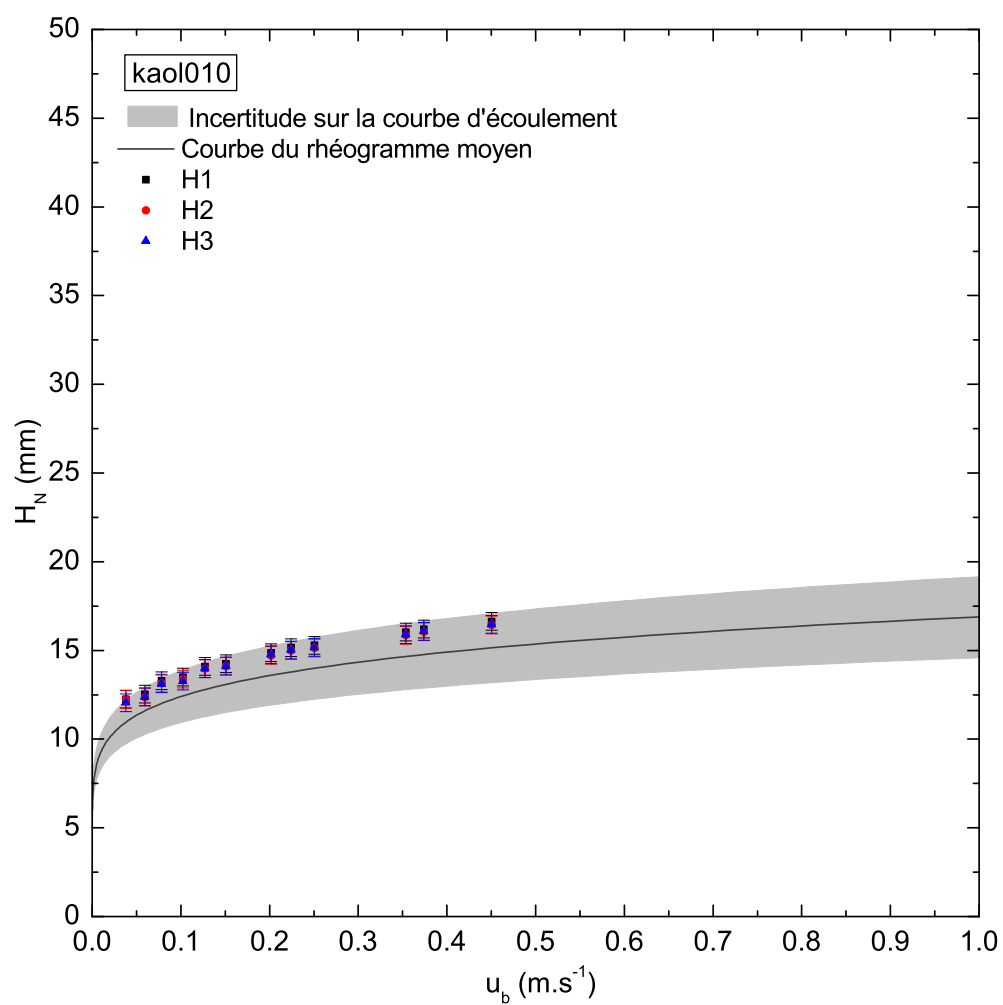


FIGURE F.8 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol010*.

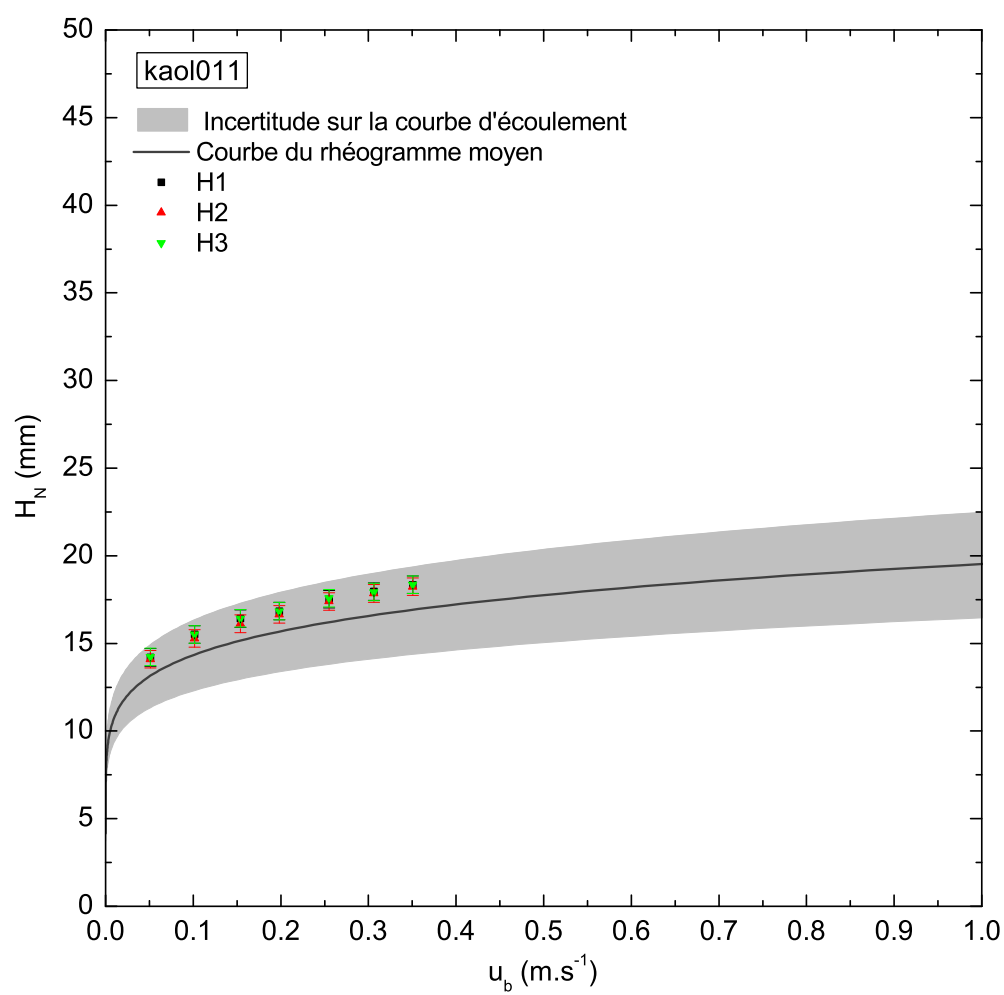


FIGURE F.9 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol011*.

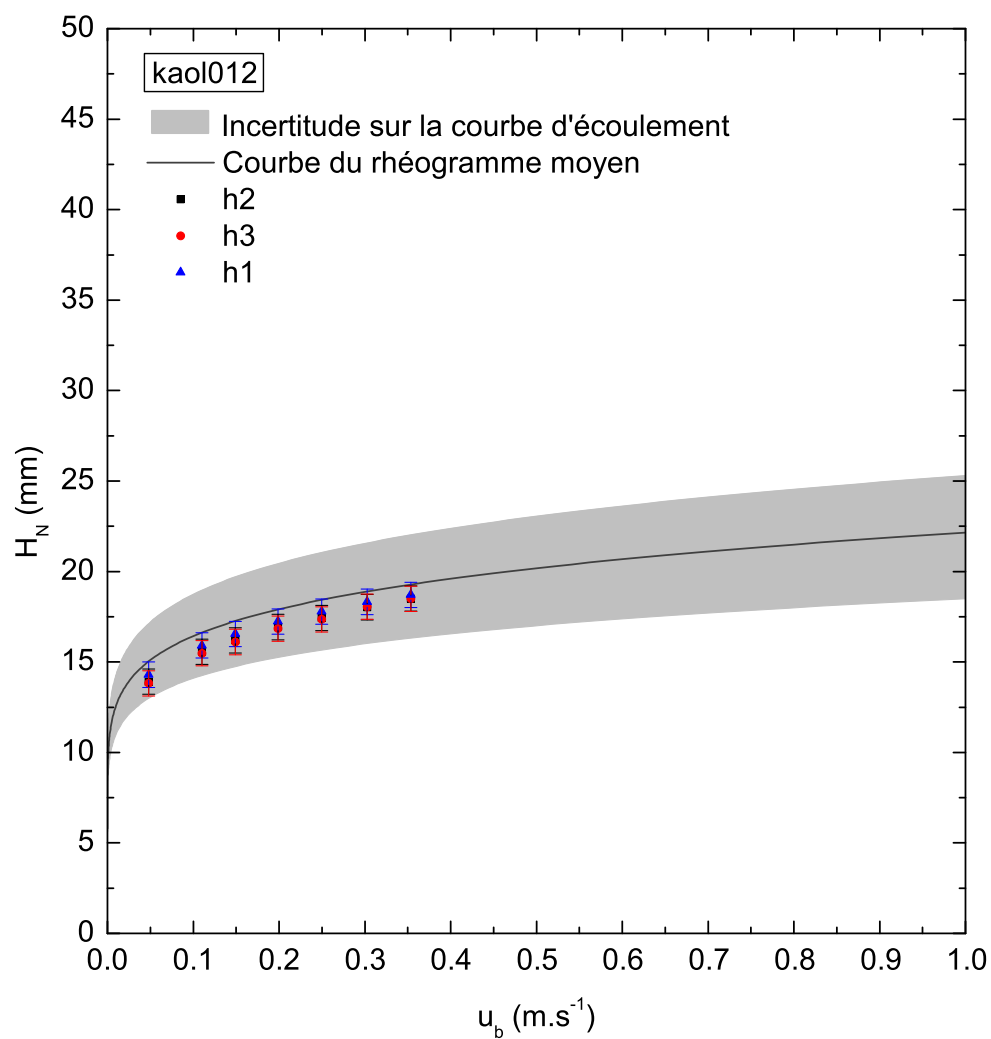


FIGURE F.10 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol012*.

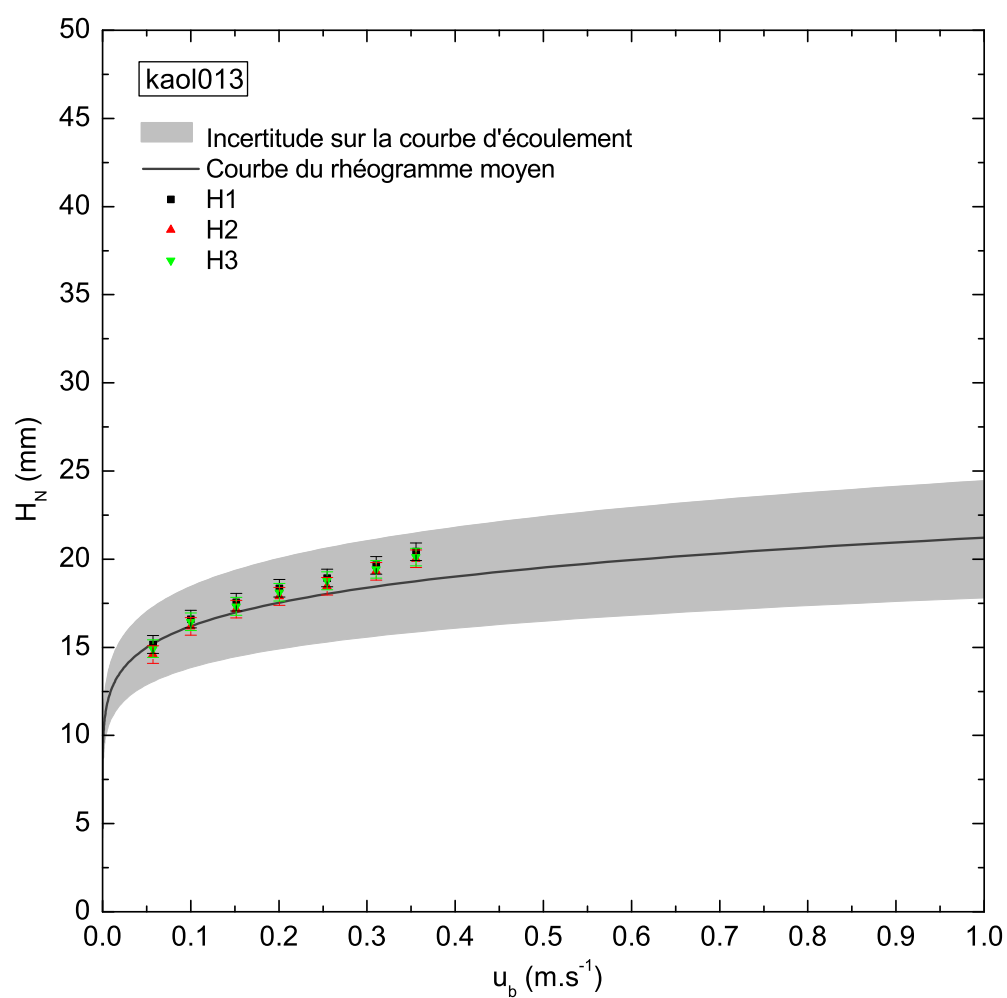


FIGURE F.11 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol013*.

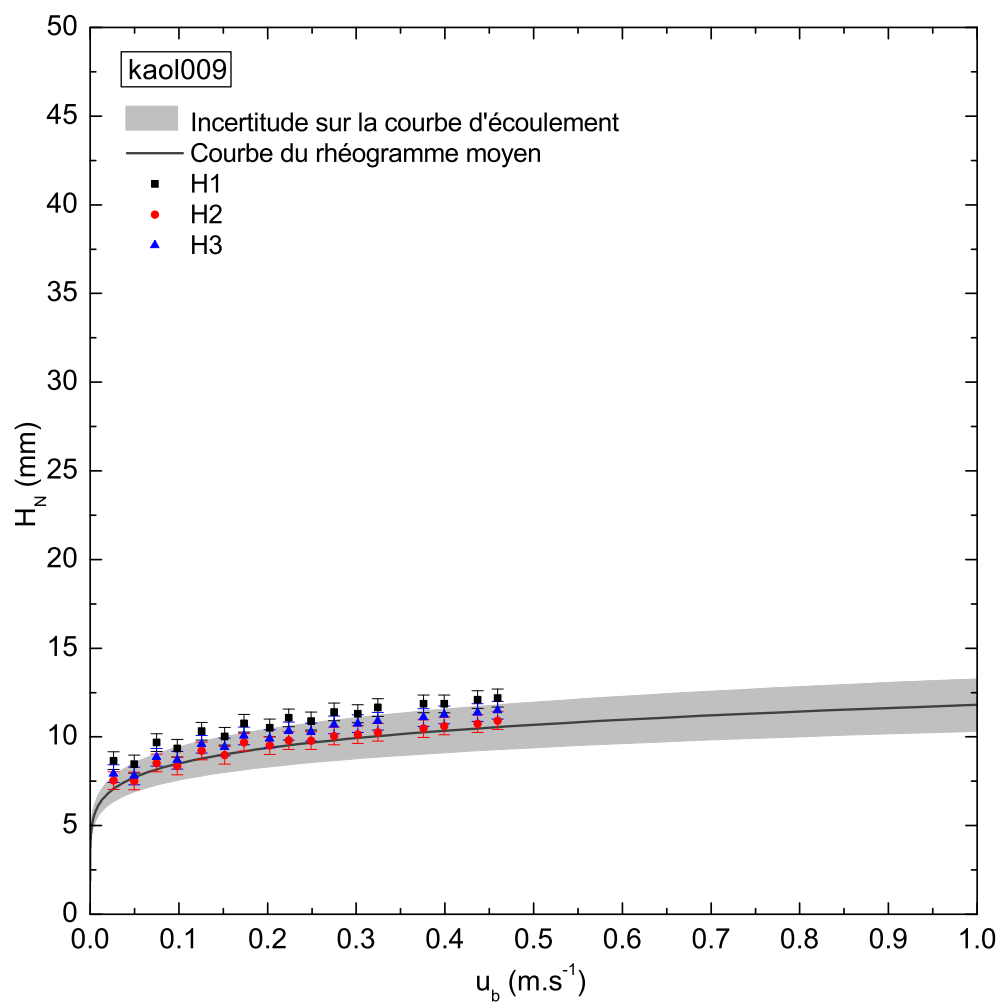


FIGURE F.12 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol019*.

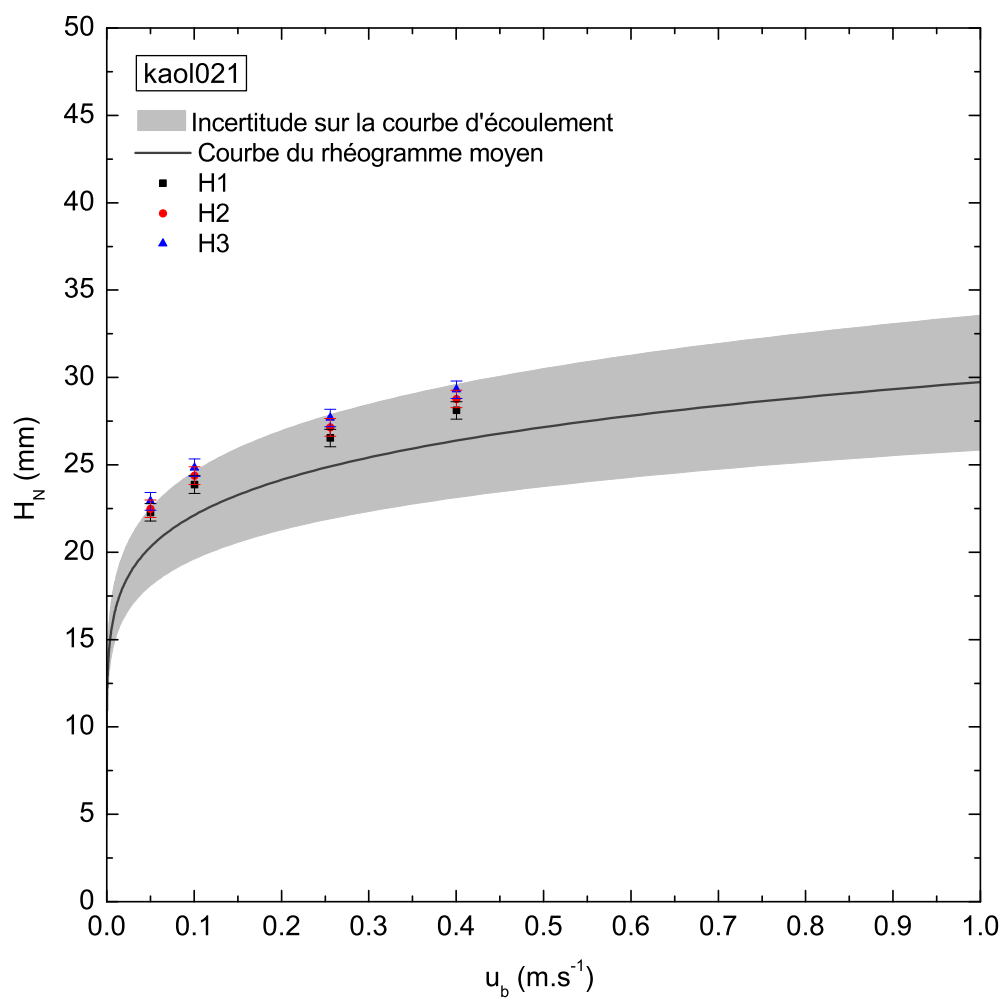


FIGURE F.13 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol021*.

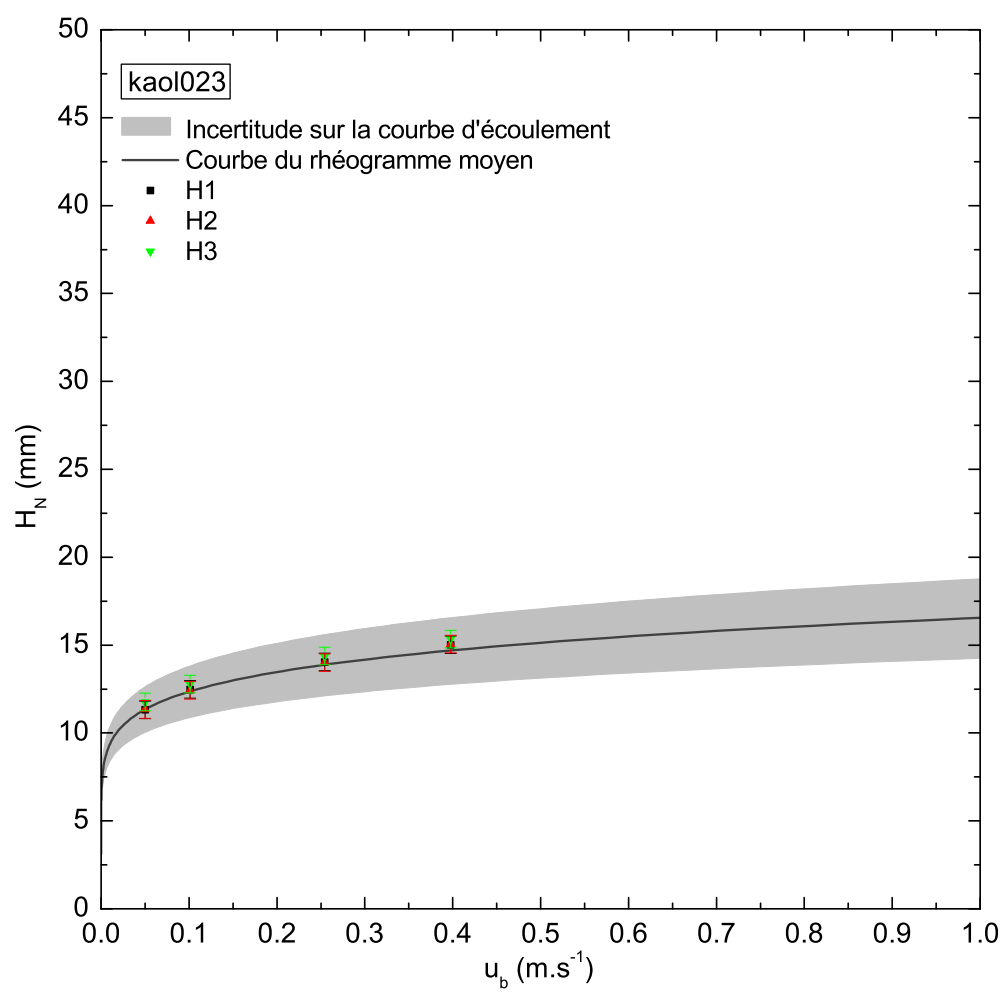


FIGURE F.14 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol023*.

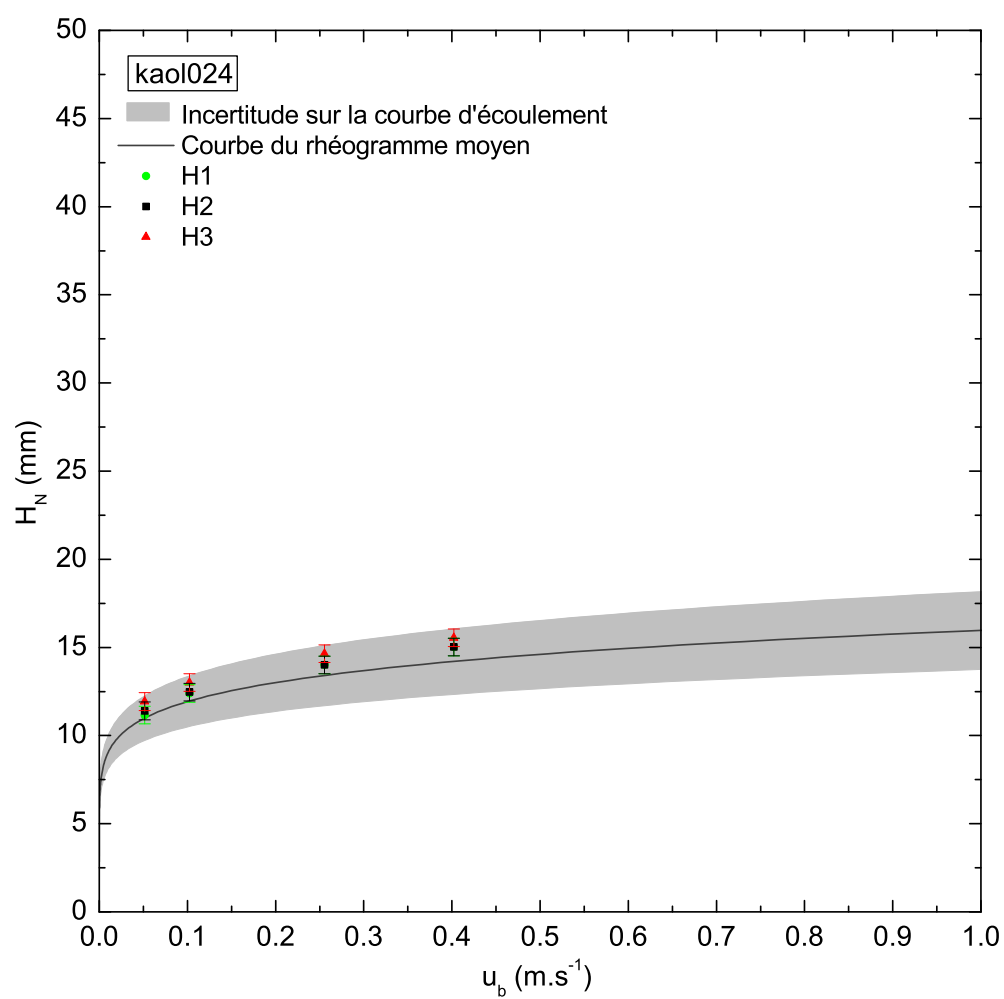


FIGURE F.15 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol024*.

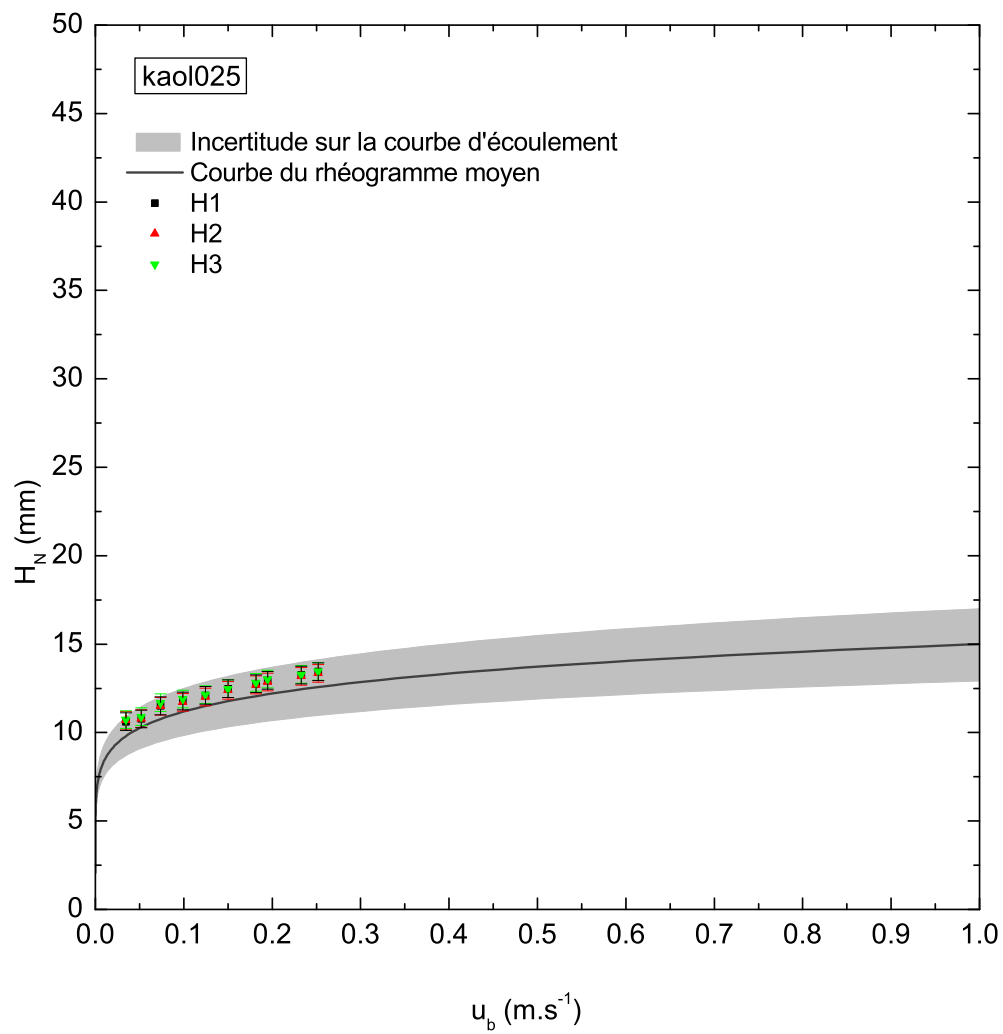


FIGURE F.16 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol025*.

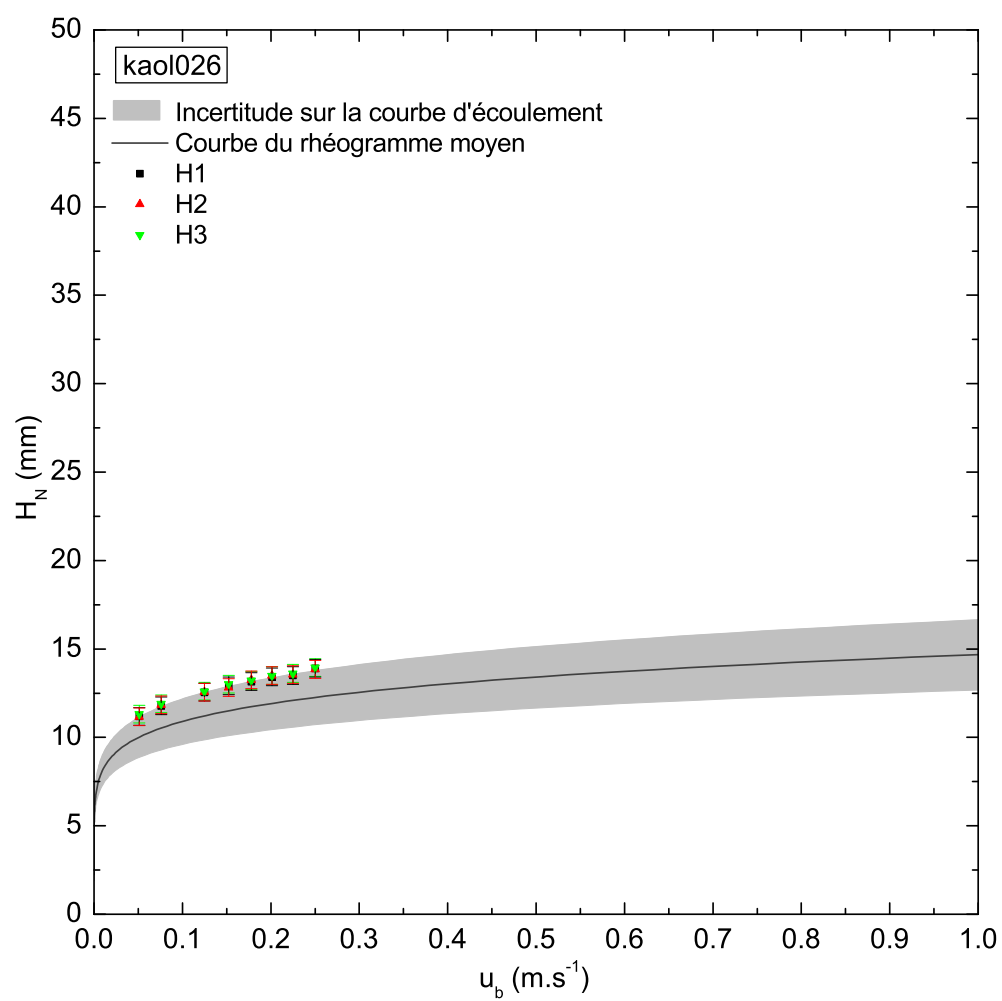


FIGURE F.17 – Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : *kaol026*.

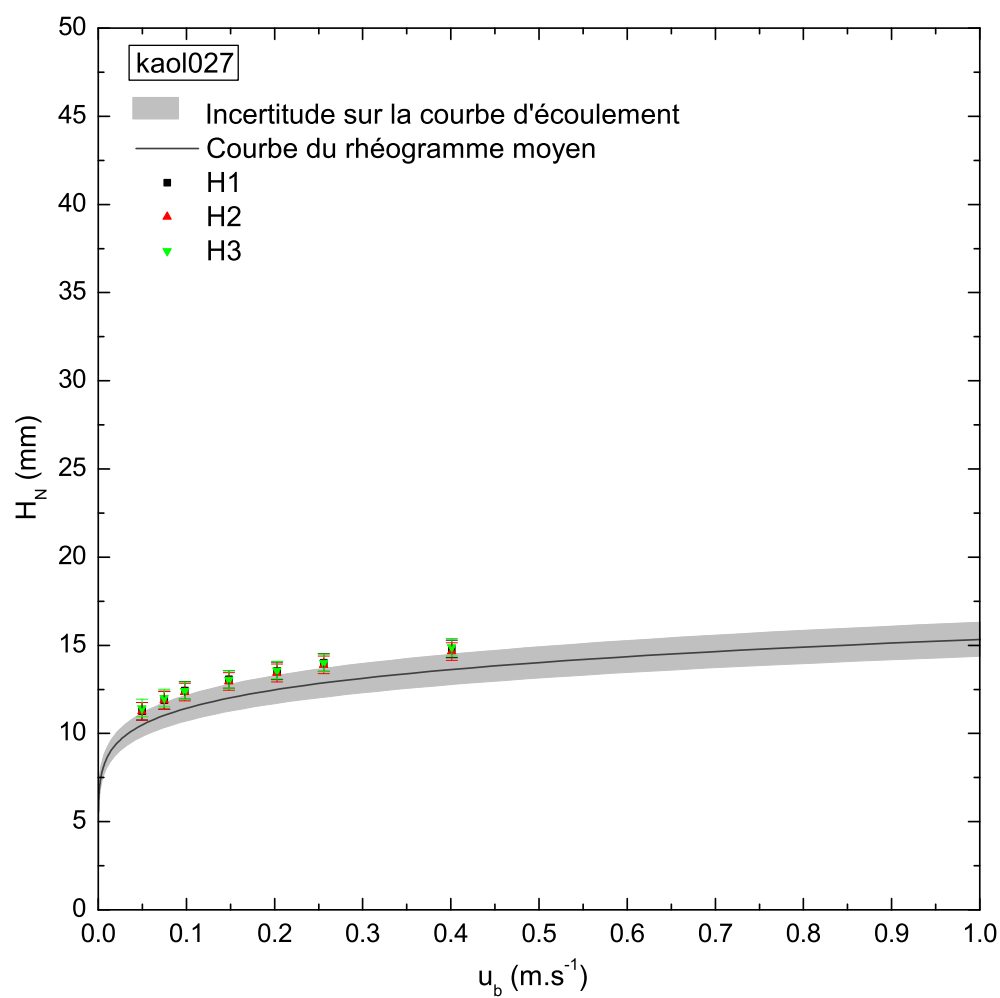


FIGURE F.18 – Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du kaolin : *kaol027*

Annexe G

Paramètres des essais : cas d'une particule isolée

Rappels :

- δ (mm) est le diamètre de la particule, ρ_p est la masse volumique de la particule.
- u_b et H_N sont les mesures de la vitesse du tapis et de la hauteur normale pour chaque acquisition.
- τ_c , k et n sont les paramètres d'ajustement de *calage* calculés pour chaque acquisition.

Acquisition	δ (mm)	ρ_p (kg.m ⁻³)	τ_c (Pa)	k (Pa.s ^{n})	n	u_b (mm.s ⁻¹)	H_N (mm)
A0	2	1410	19.25	11.84	0.403	40	39.68
A1	2	1410	19.95	12.27	0.403	63	44.15
A2	2	1410	20.12	12.38	0.403	87	47.14
A4	2	1140	18.34	11.28	0.403	63	41.17
A5	2	1140	19.74	12.14	0.403	87	46.39

TABLE G.1 – Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le *carbopol A* : $\theta = 6.7^\circ$.

Acquisition	$\delta(\text{mm})$	$\rho_p(\text{kg.m}^{-3})$	$\tau_c \text{ (Pa)}$	$k \text{ (Pa.s}^n\text{)}$	n	$u_b \text{ (mm.s}^{-1}\text{)}$	$H_N \text{ (mm)}$
B0	4	1140	19.44	12.47	0.405	53	42.66
B1	4	1140	19.70	12.64	0.405	79	46.39
B2	4	1140	22.80	14.63	0.405	48	47.88
B3	4	900	18.64	11.96	0.405	47	40.42
B4	4	900	19.42	12.46	0.405	77	45.65
B5	4	900	19.27	12.36	0.405	103	47.88
B6	4	900	20.30	13.03	0.405	122	51.62
B3b	4	1140	19.85	12.73	0.405	124	50.87
B4b	4	1140	19.49	12.50	0.405	124	50.12
B6b	4	1410	18.44	11.83	0.405	50	40.42
B7	4	1410	18.76	12.04	0.405	75	44.15
B8	4	1410	18.66	11.97	0.405	100	46.39
B9	4	1410	19.13	12.27	0.405	124	49.38

TABLE G.2 – Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le *carbopol B* : $\theta = 6.7^\circ$.

Acquisition	$\delta(\text{mm})$	$\rho_p(\text{kg.m}^{-3})$	$\tau_c \text{ (Pa)}$	$k \text{ (Pa.s}^n\text{)}$	n	$u_b \text{ (mm.s}^{-1}\text{)}$	$H_N \text{ (mm)}$
D2	8	900	9.20	7.14	0.418	102	16.37
D5	4	900	9.20	7.14	0.418	102	16.37
D14	4	900	9.46	7.34	0.418	150	18.27
D4	4	1140	9.48	7.36	0.418	102	16.75
D3	4	1410	9.48	7.36	0.418	102	16.75
D12	4	1410	9.71	7.54	0.418	150	18.65
D8	2	900	9.48	7.36	0.418	102	16.75
D7	2	1140	10.04	7.79	0.418	102	17.51
D16	2	1140	9.71	7.54	0.418	150	18.65
D6	2	1410	9.20	7.14	0.418	102	16.37

TABLE G.3 – Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le *carbopol D* : $\theta = 14.5^\circ$.

Acquisition	$\delta(\text{mm})$	$\rho_p(\text{kg.m}^{-3})$	$\tau_c \text{ (Pa)}$	$k \text{ (Pa.s}^n\text{)}$	n	$u_b \text{ (mm.s}^{-1}\text{)}$	$H_N \text{ (mm)}$
E6	2	900	3.08	3.74	0.442	53	8.24
E8	2	1140	3.08	3.74	0.442	53	8.24
E7	2	1410	3.90	4.74	0.442	53	9.81
E11	2	1410	3.42	4.16	0.442	101	10.59
E3	4	900	3.48	4.23	0.442	53	9.02
E10	4	900	3.77	4.59	0.442	101	11.38
E16	4	900	2.95	3.59	0.442	151	10.59
E2	4	1140	3.48	4.23	0.442	53	9.02
E9	4	1140	3.42	4.16	0.442	101	10.59
E15	4	1140	3.57	4.34	0.442	151	12.16
E14	4	1410	3.25	3.96	0.442	151	11.38

TABLE G.4 – Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le *carbopol E* : $\theta = 14.5^\circ$.

Bibliographie

- [1] ANCEY, C. Rhéophysique des écoulements torrentiels. Rapport.
- [2] ANCEY, C. Rhéologie des laves torrentielles. Tech. rep., Toraval, 1999.
- [3] ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows : A review. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 142 (2006), 4–35.
- [4] ANCEY, C., AND COUSSOT, P. Transition frictionnelle/visqueuse pour une suspension granulaire. *C. R. Acad. Sci. Paris* 327 (1999), 515–522.
- [5] ANCEY, C., AND JORROT, H. Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion. *J. Rheol.* 45 (2001), 297–319.
- [6] ARATTANO, M., AND Z., S. W. Modeling debris flows as kinematic waves. *Bulletin of the IAEG* 49 (1994), 95–105.
- [7] BALMFORTH, N. J., AND CRASTER, R. V. A consistent thin-layer theory for Bingham plastics. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 84 (1999), 65–81.
- [8] BARDOU, E. *Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [9] BARDOU, E., BOWEN, P., BOIVIN, P., AND BANFILL, P. Impact of small amounts of swelling clays on the physical properties of debris-flow-like granular materials. implications for the study of alpine debris flow. *Earth Surf. Process. Landforms* 32 (2007), 698–710.
- [10] BARNES, H. A. The yield stress - everything flows? *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 81 (1999), 133–178.
- [11] BARNES, H. A., AND WALTERS, K. The yield stress myth? *Rheol. Acta* 4, 24 (1985), 323–326.
- [12] BIRD, R., DAI, G., AND YARUSSO, B. J. The rheology and flow of viscoplastic materials. *Reviews in Chemical Engineering* 1 (1982), 1–70.
- [13] BONTE, M., ERGENZINGER, P., AND RAUEN, A. Geomorphological, hydrological and sedimentary control of an artificially induced debris flow. *Phys. Chem. Earth B* 25, 9 (2000), 745–749.
- [14] BORREGA, R., CLOITRE, M., BETREMIEUX, I., ERNST, B., AND LEIBLER, L. Concentration dependence of the low-shear viscosity of polyelectrolyte micro-networks : From hard spheres to soft microgels. *Europhys. Lett.* 47, 6 (1999), 729–735.
- [15] BOSSARD, F., MOHAN, M., AND AUBRY, T. Linear and nonlinear viscoelastic behavior of very concentrated plate-like kaolin suspensions. *J. Rheol.* 51 (2007), 1253–1270.

- [16] CARNALI, J. O., AND NASER, M. S. The use of dilute solution viscosimetry to characterize the network properties of carbopol microgels. *Colloid Polym. Sci.* 270 (1992), 183–193.
- [17] CHAMBON, G., AND GHEMMOUR, A., L. D. Gravity-driven surges of a viscoplastic fluid : An experimental study. *J. Non-Newtonian Fluid Mech* 158 (2009), 54–62.
- [18] CHEN, C. Comprehensive review of debris flow modelling concepts in japan. *Reviews in Engineering Geology* 7 (1987), 13–29.
- [19] CHHABRA, R. P. *Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids*. CRC Press, Boca Raton, FL (1993). Reprinted, 1994. Second edition, 2006. CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.
- [20] COCHARD, S., AND ANCEY, C. Tracking the free surface of time-dependent flows : image processing for the dam-break problem. *Exp Fluids* 44 (2008), 59–71.
- [21] COUSSOT, P. *Rhéologie des boues et laves torrentielles. Étude de dispersions et suspensions concentrées*. PhD thesis, Université Joseph Fourier de Grenoble, 1992.
- [22] COUSSOT, P. Rhéologie des laves torrentielles. *La Houille Blanche* 3 (1994), 32–36.
- [23] COUSSOT, P. Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. *J. Hydraul. Res.* 32, 4 (1994), 535–559.
- [24] COUSSOT, P. Structural similarity and transition from Newtonian to Non-Newtonian behavior for clay-water suspensions. *Phys. Rev. Lett.* 74, 20 (1995), 3971–3974.
- [25] COUSSOT, P. *Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials. Applications in industry and environment*. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [26] COUSSOT, P., AND ANCEY, C. *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. EDP Sciences, 1999.
- [27] COUSSOT, P., AND LAIGLE, D. étude des laves torrentielles sur modèle réduit en similitude des phénomènes naturels. *La houille blanche* 3 (1994), 44–49.
- [28] COUSSOT, P., LAIGLE, D., ARATTANO, M., DEGANUTTI, A., AND MARCHI, L. Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *J. Hydraul. Eng.* 124, 8 (Aug. 1998), 865–868.
- [29] COUSSOT, P., AND MEUNIER, M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews* 40 (1996), 209–227.
- [30] COUSSOT, P., MEUNIER, M., AND PIAU, J.-M. Rhéologie des laves torrentielles. In *Actes du 25ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie, Grenoble, France* (1990).
- [31] COUSSOT, P., NGUYEN, Q. D., HUYNH, H. T., AND BONN, D. Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids. *J. Rheol.* 46 (2002).
- [32] COUSSOT, P., AND PIAU, J.-M. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta* 33 (1994), 175–184.
- [33] COUSSOT, P., AND PIAU, J.-M. The effects of an addition of force-free particles on the rheological properties of fine suspensions. *Can. Geotech. J.* 32 (1995), 263–270.
- [34] COUSSOT, P., RAYNAUD, J. S., BERTRAND, F., MOUCHERONT, P., GUILBAUD, J. P., HUYNH, H. T., JARNY, S., AND LESUEUR, D. Coexistence of liquid and solid phases in flowing soft-glassy materials. *Phys. Rev. Lett.* 88, 21 (2002).

- [35] COUSSOT, P., ROUSSEL, N., JARNY, S., AND CHANSON, H. Continuous or catastrophic solid-liquid transition in jammed systems. *Phys. Fluids* 17 (2005).
- [36] COUSSOT, P., TABUTEAU, H., CHATEAU, X., TOCQUER, L., AND OVARLEZ, G. Aging and solid or liquid behavior in pastes. *J. Rheol.* 50 (2006), 975.
- [37] D., L., HECTOR, A.-F., HÜBL, J., AND RICKENMANN, D. Comparison of numerical simulations of muddy debris flows spreading to records of real events. In *In Proceedings of the Third International Conference on Debrisflow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos, Switzerland* (2003), R. & and M. Chen eds., Eds., pp. 635–646.
- [38] DAVIES, T. R. H. Debris flow surges - A laboratory investigation. *Mitt. des Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* 96 (1988), 1–122.
- [39] DRAGONI, M., BORSARI, I., AND TALLARICO, A. A model for the shape of lava flow fronts. *J. Geophys. Res.* 110 (2005).
- [40] FOUCAULT, A. E. R. J. *Dictionnaire de géologie*, 6 ed. 2005.
- [41] HOGG, A. J., AND PRITCHARD, D. The effect of hydraulic resistance on dam-break and other shallow inertial flows. *J. Fluid Mech.* 501 (2004), 179–212.
- [42] HUANG, X., AND GARCIA, M. H. A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope. *J. Fluid Mech.* 374 (1998), 305–333.
- [43] HUEBL, J., AND STEINWENDTNER, H. Estimation of rheological properties of viscous debris flow using a belt conveyor. *Phys. Chem. Earth B* 25, 9 (2000), 751–755.
- [44] HUTTER, K., SVENDSEN, B., AND RICKENMANN, D. Debris flow modeling : A review. *Continuum Mech. Thermodyn.* 8 (1996), 1–35.
- [45] IVERSON, R. The debris-flow rheology myth. *Debris-flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment* 1 (2003), 303–314.
- [46] IVERSON, R. M. The physics of debris flows. *Rev. Geophys.* 35, 3 (1997), 245–296.
- [47] IVERSON, R. M. Debris-flow mechanics. In *Debris-flow hazards and related phenomena*, M. Jakob and O. Hungr, Eds. Springer, Berlin Heidelberg, 2005, pp. 105–134.
- [48] JOGUN, S. M., AND ZUKOSKI, C. F. Rheology and microstructure of dense suspensions of plate-shaped colloidal particles. *J. Rheol.* 43 (1999).
- [49] JOHNSON, G., MASSOUDI, M., AND RAJAGOPAL, K. R. A review on interaction mechanisms in fluid-solid flows. Tech. rep., Pittsburgh Energy Technology Center, 1990.
- [50] JOSSIC, L., AND MAGNIN, A. Drag and stability of objects in a yield stress fluid. *AIChE Journal* 47, 12 (2001), 2666–2672.
- [51] LABANDA, J., MARCO, P., AND LLORENS, J. Rheological model to predict the thixotropic behaviour of colloidal dispersions. *Colloids and Surfaces A* 249 (2004), 123–126.
- [52] LAIGLE, D., AND COUSSOT, P. Numerical modeling of mudflows. *J. Hydraul. Eng.* 123, 7 (1997), 617–623.
- [53] LAREO, C., FRYER, P. J., AND BARIGOUE, M. The fluid mechanics of two-phase solid-liquidfood flows : a review. *Trans IChemE* 75 (1997).
- [54] LEE, D., GUTOWSKI, I. A., AE, B., , RUBATAT, L., DE BRUYN, J. R., AND J., F. B. Investigating the microstructure of a yield-stress fluid by light scattering. *PHYSICAL REVIEW E* 83 (2011).

- [55] LORENZINI, G., AND MAZZA, N. *Debris flow : phenomenology and rheological modelling*. WIT Press, 2004.
- [56] LUU, L. *Impact de gouttes de fluides à seuil : rhéologie, splash et cratères*. PhD thesis, Université de Provence Aix-Marseille I, 2011.
- [57] MACOSKO, C. W. *Rheology : à principes, measurements, and applicationsăă*. 1994.
- [58] MAGNIN, A., AND PIAU, J. M. Shear rheometry of fluids with a yield stress. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 23 (1987), 91–106.
- [59] MAGNIN, A., AND PIAU, J. M. Cone-and-plate rheometry of yield stress fluids. Study of an aqueous gel. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 36 (1990), 85–108.
- [60] MAJOR.
- [61] MAJOR, J. J., AND PIERSON, T. C. Debris flow rheology : Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour. Res.* 28, 3 (1992), 841–857.
- [62] MALET, J. P., LAIGLE, D., REMAITRE, A., AND MAQUAIRE, O. Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. *Geomorphology* 66, 1-4 (Mar. 2005), 215–235.
- [63] MATAS, J., MORRIS, J., AND GUAZZELLI, E. Lateral forces on a sphere. *Oil & Gas Science and Technology Ũ Rev. IFP* 59 (2004).
- [64] METZNER, A., B., AND WITHLOCK, M. Flow behavior of concentrated (dilatant) suspensions. *Trans. Soc. Rheol.* 2 (1958), 239–254.
- [65] MEUNIER, M. Eléments d'hydraulique torrentielle. *Cemagref, Collections Etudes, série Montagne* 1 (1991), 274.
- [66] MØLLER, P. C. F., FALL, A., AND BONN, D. Origin of apparent viscosity in yield stress uids below yielding. *Eur. Phys. Lett.* 87 (2009).
- [67] NOVEON. Carbopol etd 2623 polymer.
- [68] O'BRIEN, J. S., AND JULIEN, P. Y. Physical properties and mechanics of hyper-concentrated sediment flows. In *Specialty Conference on Delineation of landslides, Flash Flood & Debris Flow Hazards in Utah* (1985), pp. 260–279. voir lorenzini.
- [69] OPPONG, F. K., RUBATAT, L., FRISKEN, B. J., BAILEY, A. E., AND DE BRUYN, J. R. Microrheology and structure of a yield-stress polymer gel. *Phys. Rev. E* 73, 4 (Apr. 2006).
- [70] OVARLEZ, G., BARRAL, Q., AND COUSSOT, P. Three-dimensional jamming and flows of soft glassy materials. *Nature Materials* 9 (2010), 115–119.
- [71] PASTOR, M., QUECEDO, M., GONZALEZ, E., HERREROS, M. I., FERNANDEZ MERODO, J. A., AND MIRA, P. Simple approximation to bottom friction for Bingham fluid depth integrated models. *J. Hydraul. Eng.* 130, 2 (2004), 149–155.
- [72] PERAZZO, C. A., AND GRATTON, J. Steady and traveling flows of a power-law liquid over an incline. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 118, 1 (Mar. 2004), 57–64.
- [73] PERAZZO, C. A., AND GRATTON, J. Exact solutions for two-dimensional steady flows of a power-law liquid on an incline. *Phys. Fluids* 17, 1 (Jan. 2005).
- [74] PIAU, J. M. Flow of a yield stress fluid in a long domain. Application to flow on an inclined plane. *J. Rheol.* 40, 4 (1996), 711–723.
- [75] PIAU, J.-M. The relevance of the early days of viscosity, slip at the wall, and stability in concentric cylinder viscometry. *J. Rheol.* 49 (2005), 1539Ũ1550.

- [76] PIAU, J. M. Carbopol gels : Elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges. meso- and macroscopic properties, constitutive equations and scaling laws. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 144 (2007), 1–29.
- [77] PIERSON, T. C., AND COSTA, J. E. A rheological classification of subaerial sediment-water flows. *review in Engineering Geology, American Geological Society VII* (1987), 1–12.
- [78] RICKENMANN, D. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19 (1999), 47–77.
- [79] RICKENMANN, D., LAIGLE, D., MCARDELL, B. W., AND HÜBL, J. Comparison of 2d debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences* 10 (2006), 241–264.
- [80] ROBERT, G. P., AND BARNES, H. A. New measurements of the flow-curves for Carbopol dispersions without slip artefacts. *Rheol. Acta* 40 (2001), 499–503.
- [81] SARAMITO, P. A new elastoviscoplastic model based on the herschel-bulkley viscoplasticity. *J. Non Newtonian Fluid Mech* (2009), 145, 1–14.
- [82] SAVAGE, S. B., AND HUTTER, K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.* 199 (1989), 177–215.
- [83] SCHWEDOFF, T. La rigidité des fluides. In *Congrès Intern. de Physique* (1900), vol. 1, pp. 478–486.
- [84] TABUTEAU, H., BAUDEZ, J.-C., BERTRAND, F., AND COUSSOT, P. Mechanical characteristics and origin of wall slip in pasty biosolids. *Rheol. Acta* 43 (2004), 168–174.
- [85] TAKAHASHI, T., N. H., AND KUANG, S. Estimation of debris flow hydrograph on varied slope ped, erosion and sedimentation in the pacific rim. In *Proceedings of the Corvallis Symposium, IAHS* (1987).
- [86] TAKAHASHI, T. Debris flow. *Fluid mechanics* 13 (1981), 57–77.
- [87] TAKAHASHI, T. *Debris Flow*. IAHR Monograph Series. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1991.
- [88] TIBERGHIE, D. *Étude expérimentale de l'interaction d'un écoulement à surface libre de fluide à seuil avec un obstacle : Application aux laves torrentielles boueuses*. PhD thesis, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, 2007.
- [89] VREUGDENHILL, C. B. *Numerical Methods for Shallow-water Flow*. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 1994.
- [90] WU, C.-S., AND KWAK, Y. T. Characterization of microgels by Brookfield viscosimetry with cylindrical, T-bar, and flags impeller spindles. *J. Appl. Polym. Sci.* 71 (1999), 67–74.
- [91] YOSHIMURA, A., AND PRUD'HOMME, R. K. Wall slip corrections for Couette and parallel disk viscosimeters. *J. Rheol.* 32, 1 (1988), 53–67.

Table des figures

1.1	À droite, vue d'ensemble d'un dépôt de lave à l'amont d'un ouvrage de protection : nous pouvons distinguer en particulier des blocs métriques. À gauche, petits débris et éléments fins de cette même coulée.	14
1.2	Entités fonctionnelles d'une lave torrentielle [8].	15
1.3	Les dégâts engendrés par les laves torrentielles.	16
1.4	Classification rhéologique de [77] pour des mélanges eau-sédiments (voir [8]). . .	19
1.5	Classification rhéologique des laves torrentielles [2].	20
1.6	Modèle viscoplastique granulaire de [9] sur la base de la courbe granulométrique des laves torrentielles naturelles.	21
2.1	Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent et uniforme sur un plan : notations.	31
2.2	Profil de vitesse théorique de l'écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley en régime permanent et uniforme sur un plan incliné.	31
2.3	Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley sur un plan incliné : notations (expressions 2.9 et 2.10).	33
2.4	Écoulement d'un fluide de Herschel-Bulkley sur un plan incliné : notations (expressions 2.12 et 2.12).	34
2.5	Bilan des forces exercées sur une particule isolée dans un fluide : notations. . .	35
3.1	Dispositif de préparation de la solution de carbopol.	43
3.2	Représentation schématique du rhéomètre rotatif utilisé pour les mesures : il est possible de faire varier la taille de l'entrefer h et/ou le diamètre ($\phi_i = 2R_i$) de l'outil supérieur $\phi_1 = 40 \text{ mm}$ ou $\phi_2 = 60 \text{ mm}$. Le diamètre de l'outil inférieur est fixe, $\phi_2 = 60 \text{ mm}$	45
3.3	Évolution du taux de cisaillement en fonction du temps pour différents niveaux de contrainte, pour une solution de carbopol (<i>carb009b</i>) (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).	47
3.4	Évolution du taux de cisaillement en fonction du temps pour une contrainte imposée de 14 Pa, pour une solution de kaolin <i>kaol00B</i> (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).	48
3.5	Courbes d'écoulement d'une solution de carbopol obtenues par mode de paliers décroissants (<i>test06 D</i> et <i>test15</i>). Les points individuels correspondent à des essais à contrainte constante, les mesures étant prises au-delà du temps de réponse du matériau (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).	49

3.6	Courbes d'écoulement d'une solution de carbopol obtenues par mode de paliers croissants <i>test01 C</i> puis décroissants <i>test01 D</i> . Un essai à contrainte constante est représenté par un point unique obtenu en moyennant le taux de cisaillement au delà du temps de réponse du matériau (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).	50
3.7	Courbes d'écoulement pour une solution de carbopol obtenues par mode de paliers croissants <i>test06 C</i> puis décroissants <i>test06 D</i> (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).	52
3.8	Courbes d'écoulement pour une solution de kaolin obtenues par mode de paliers croissants <i>test01 C</i> puis décroissants <i>test01 D</i> , avec répétition pour chaque cas (Diamètre d'outil : 60 mm ; entrefer : 1500 μm).	53
3.9	Rhéogramme pour un échantillon de carbopol : les points de données indiquent les mesures, les lignes continues représentent l'ajustement de la totalité de ces mesures expérimentales selon une loi de Herschel-Bulkley. Les paramètres rhéologiques obtenus pour le <i>test01</i> du carbopol <i>carb000</i> sont : $\tau_c = 8.49 \text{ Pa}$, $k = 7.18 \text{ Pa.s}^n$, $n = 0.421$	55
3.10	Rhéogrammes pour un échantillon de kaolin. Les points de données indiquent les mesures. Les lignes continues représentent l'ajustement de ces mesures expérimentales selon une loi de Herschel-Bulkley. L'ajustement <i>FIT I</i> est appliqué sur la gamme des faibles taux de cisaillement $[10^{-2}; 1] \text{ s}^{-1}$. L'ajustement <i>FIT II</i> est appliqué sur la gamme des forts taux de cisaillement $[1; 10^2] \text{ s}^{-1}$. L'ajustement <i>FIT III</i> est appliqué sur la gamme de cisaillement $[10^{-2}; 10^2] \text{ s}^{-1}$ retenue pour notre étude.	57
3.11	Évolution de l'écart type absolu $e_{0,i}$ sur les mesures de contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour le carbopol <i>carb000</i> . La ligne continue représente un ajustement selon une loi de Herschel-Bulkley ($a_0 = 0.209 \text{ Pa}$, $b_0 = 0.253 \text{ Pa.s}^{c_0}$ et $c_0 = 0.475$).	60
3.12	Évolution de l'incertitude relative $\delta_{0,i}$ sur les mesures de contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour le carbopol <i>carb000</i> . La ligne continue représente un ajustement selon une loi de Herschel-Bulkley ($a_\delta = 0.02 \text{ Pa}$, $b_\delta = 0.01 \text{ Pa.s}^{c_\delta}$ et $c_\delta = 0.206$).	61
3.13	Rhéogramme moyen (en tait plein) et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement pour le carbopol <i>carb000</i> . Les points représentent les 19 essais (les répétitions) effectués.	63
4.1	Schéma de principe du dispositif expérimental : canal incliné à fond mobile. . .	66
4.2	Allure qualitative du profil des vitesse d'un fluide de Herschel-Bulkley en écoulement permanent et uniforme sur un plan incliné (a) sans tapis roulant (b) avec un tapis roulant qui défile vers l'amont du canal avec une vitesse $V = u_b$. .	67
4.3	Vue d'ensemble du dispositif expérimental.	68
4.4	À gauche, capteur de déplacement angulaire fixé sur le tambour d'entraînement du tapis. Le tambour est couplé au moteur par une courroie crantée. À droite, capteur de déplacement angulaire fixé sur un disque entraîné par le tapis. . . .	69
4.5	Mire 3D composée de deux disques concentriques disposée sur le fond du tapis dans le champ d'acquisition délimité par une grille graduée en arrière plan : une prise de vue de la grille seule sur le plan intérieur de la rive permet de déterminer l'échelle.	70

4.6	(a) image brute dans la zone hauteur normale (b) image en niveau de gris à traiter (c) image brute sur grille de référence	71
4.7	(a) Capteur à ultrasons et capteur laser fixés à mi-largeur du canal à la hauteur des rives (20 cm) perpendiculairement au tapis (b) Deux cales de calibration en acier placées au droit d'un capteur laser : la cale supérieure est recouverte d'un adhésif sur la surface de réflexion de la ligne laser du capteur	72
4.8	Empilement des cales de calibration au droit d'un capteur de hauteur ponctuelle	73
4.9	Tension enregistrée en fonction du temps pour chaque hauteur cumulée par palier : calibration avant essai avec 6 cales puis calibration après essai avec uniquement 2 cales.	74
4.10	Détermination de la fonction de calibration d'un capteur à ultrasons : la tension enregistrée en fonction de la hauteur cumulée pour une calibration avant essai avec 6 cales puis avec 2 cales après l'essai. Chaque point correspond à la moyenne du signal de tension sur 5 s, échantillonné sur chacun des paliers de calibration de la figure 4.9.	75
4.11	Points de données (cas du kaolin) : enregistrement de hauteur d'écoulement en fonction du temps. Trait plein : moyenne sur la série de données.	76
4.12	Points de données (cas du carbopol) : enregistrement de hauteur d'écoulement en fonction du temps. Trait plein : moyenne sur la série de données.	77
5.1	Représentation schématique de la disposition des capteurs au dessus de l'écoulement. Le capteur H_1 est à technologie laser, les capteurs H_2 et H_3 sont de technologie à ultrasons. La distance d entre les capteurs varie selon l'essai de 15 cm à 20 cm.	80
5.2	Allure d'une coulée stationnaire sur le canal expérimental à fond mobile : le front (I), zone uniforme d'épaisseur constante désignée par la hauteur H_N (II) et zone influencée par la paroi amont (III).	82
5.3	Schématisation du suivi des trajectoires majeures de traceurs incorporés dans une solution transparente de carbopol.	83
5.4	Hauteur de l'écoulement en fonction du temps, mesurée avec les deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3 , pour une solution de kaolin (<i>kaol008</i>)	84
5.5	Hauteur de l'écoulement en fonction du temps, mesurée avec les deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3 , pour une solution de carbopol (<i>carb011</i>)	85
5.6	Profil de vitesse transverse à la surface libre pour une coulée stationnaire de carbopol (en haut) et de kaolin (en bas).	86
5.7	Disposition des capteurs à ultrasons pour l'essai <i>carb008a</i>	87
5.8	Différence de mesure de hauteur d'écoulement entre le centre et le bord de la coulée pour l'essai <i>carb008a</i> . Voir la disposition des capteurs sur la figure 5.7.	88
5.9	Mesures de hauteur d'écoulement de kaolin obtenues avec trois capteurs : un capteur laser H_1 et deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3	89
5.10	Mesures de hauteur d'écoulement de carbopol obtenues avec deux capteurs à ultrasons H_2 et H_3	90
5.11	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour différentes solutions de carbopol et différentes pentes.	91
5.12	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour deux pentes (6.7° et 12°) à propriétés rhéologiques quasi-fixées.	92

5.13	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour une pente de 22.2° et différentes solutions de carbopol.	93
5.14	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N , avec la vitesse du tapis u_b , pour différentes préparations de kaolin (pente, contrainte seuil).	94
5.15	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour une pente de 19.8° et différentes solutions de carbopol.	95
5.16	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse du tapis u_b , pour deux matériaux, avec un seuil de contrainte similaire (6.5 Pa), pour 2 pentes différentes (6.80° et 14.8°).	96
5.17	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau <i>carb007</i> : Incertitudes sur la vitesse et sur la hauteur.	98
5.18	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau <i>carb010b</i> avec les paramètres rhéologiques avant et après essai sur le canal.	100
5.19	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau <i>carb003a</i>	101
5.20	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau <i>carb008a</i>	102
5.21	Relation entre nombre adimensionnel H_b et nombre adimensionnel G prédit par la relation 5.6 pour différentes valeurs de n : cas du carbopol ($n_{max} = 0.428$, $n_{min} = 0.371$ et $n = 0.4$) et cas du kaolin ($n_{max} = 0.200$, $n_{min} = 0.154$ et $n = 0.2$).	104
5.22	Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points. La courbe théorique est la courbe pleine. <i>AV</i> et <i>AP</i> désignent respectivement les points de données obtenus avec les mesures de rhéométrie sur des échantillons prélevés avant et après essai sur le canal.	105
5.23	Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points avec des barres d'erreur. La courbe théorique est la courbe pleine. <i>AV</i> et <i>AP</i> désignent respectivement les points de données obtenus avec les mesures de rhéométrie sur des échantillons prélevés avant et après <i>le même essai</i> sur le canal.	106
5.24	Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points. La courbe théorique est la courbe pleine.	107
5.25	Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel G . Les données expérimentales sont représentées par des points avec des barres d'erreurs. La courbe théorique est la courbe pleine. Nous distinguons sur la figure du bas, les essais réalisés avec des largeurs différentes (<i>kaol011</i> , <i>kaol012</i> et <i>kaol013</i>). Tous les points ont été obtenus avec des mesures de rhéométrie sur des échantillons prélevés après essai sur le canal (<i>ap</i>).	110
5.26	Évolution de ΔH en fonction de la vitesse du tapis u_b	111
5.27	Évolution de ΔH en fonction de la hauteur expérimentale de l'écoulement H_N	111
5.28	Évolution de ΔH en fonction du nombre adimensionnel H_b	112
5.29	Évolution de ΔH en fonction du nombre adimensionnel F_r	112
5.30	Évolution de ΔH en fonction du nombre adimensionnel G	113
5.31	Images d'acquisition du <i>carb006a</i> , <i>carb009a</i> et <i>carb010b</i>	113

5.32	Évolution de la hauteur de l'écoulement H_N avec la vitesse de défilement du tapis u_b pour le matériau <i>carb010b</i> : illustration du calage des données pour les propriétés rhéologiques avant et après essai sur le canal. Pour un rapport $k/\tau_c = 0.7$, un indice d'écoulement $n = 0.383$ et une masse volumique du fluide $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$, les paramètres d'ajustement τ_c et k sont : pour le premier point qui correspond à la vitesse la plus faible la série de données ($\tau_c = 19.74 \text{ Pa}$, $k = 13.13 \text{ Pa.s}^n$), pour le dernier point qui correspond à la vitesse plus élevée de la série ($\tau_c = 18.57 \text{ Pa}$, $k = 12.35 \text{ Pa.s}^n$), enfin l'ajustement global sur toute la série de données donne ($\tau_c = 18.87 \text{ Pa}$, $k = 12.55 \text{ Pa.s}^n$). Les paramètres d'ajustement obtenus avec les mesures avant et après essai sont en annexe C. .	114
6.1	a) Vue de haut de l'incorporation de la particule au centre de la coulée. b) Vue de face 'simultanée' de la particule introduite à mi-hauteur.	116
6.2	Courbe vitesse-hauteur pour le matériau <i>carbopol A</i>	118
6.3	Courbe vitesse-hauteur pour le matériau <i>carbopol B</i>	119
6.4	Courbe vitesse-hauteur pour le matériau <i>carbopol D</i>	120
6.5	Courbe vitesse-hauteur pour le matériau <i>carbopol E</i>	121
6.6	Différence entre hauteur expérimentale mesurée ($H_{exp} = H_N$) et hauteur théorique H_{theor} obtenue avec les paramètres d'ajustement du rhéogramme moyen, pour une vitesse donnée u_b	122
6.7	Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel $G - 1$. Les données expérimentales sont représentées par des points. Les nombres H_b et G sont calculés avec les paramètres rhéologiques de calage (voir l'annexe G) et les mesures expérimentales H_N et u_b . La courbe pleine est la courbe théorique.	123
6.8	Représentation du nombre adimensionnel H_b en fonction du nombre adimensionnel F_r pour les données expérimentales H_N et u_b . Le nombre H_b est calculé avec les paramètres rhéologiques de calage (voir l'annexe G).	124
6.9	(a) vue de face de la mire 3D et du damier de référence disposés sur le canal (b) vue de face globale d'une coulée de carbopol dans laquelle évolue une particule de couleur blanche. Le champ d'acquisition correspond à la zone la plus intensément éclairée. Un fond blanc est placé derrière la rive opposée.	125
6.10	Vue de haut du positionnement du damier : (av) positionné avant le plan central du canal (ap) après le plan central.	126
6.11	Désignation des points de repère sur un schéma d'une particule sphérique : A, B, le centre de gravité CG, le point P (Pi et Pj sont ses positions dans deux images prises à des instants différents sur le parcours de la particule).	128
6.12	Addition de deux images sur des intervalles de 1 s sur la trajectoire d'une particule sphérique (diamètre 8 mm et masse volumique 1410 kg.m^{-3}). u_b est la vitesse de défilement du tapis, u_{rot} est la vitesse de rotation et u_{trs} est la vitesse de translation de la particule.	128
6.13	Particule dans le champ de vitesse d'une coulée de carbopol sur le canal expérimental.	129
6.14	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol A</i> : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$	130
6.15	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol B</i> : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$	131

6.16	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol</i> <i>D</i> : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$	132
6.17	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol</i> <i>E</i> : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction de $\frac{x}{\delta}$	133
6.18	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol</i> <i>A</i> : Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t	134
6.19	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol</i> <i>B</i> Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t	135
6.20	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol</i> <i>D</i> Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t	136
6.21	Coordonnées du centre de gravité des particules en mouvement dans le <i>carbopol</i> <i>E</i> Le rapport $\frac{y-h_0}{\delta}$ en fonction du temps t	137
6.22	Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le <i>carbopol D</i>	140
6.23	Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le <i>carbopol E</i>	141
6.24	Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le <i>carbopol D</i>	142
6.25	Comparaison entre la vitesse longitudinale de la particule u_x et la vitesse théorique du fluide $u_{f,\delta}$ pour le <i>carbopol E</i>	143
6.26	La vitesse moyenne de chute expérimentale $\bar{u}_y$ en fonction de la vitesse limite de Stokes u_s : zone cisailée.	145
6.27	La vitesse moyenne de chute expérimentale $\bar{u}_y$ en fonction de la vitesse du tapis u_b : zone du plug.	146
6.28	La vitesse moyenne de chute expérimentale $\bar{u}_y$ en fonction du nombre sans dimension Y : zone du plug.	147
6.29	Le nombre Y pour chaque essai : positionnement de deux valeurs typiques du nombre sans dimension Y dans la littérature [19].	149
6.30	Le nombre de Reynolds et le nombre de Stokes de la particule pour chaque série d'essai.	150
A.1	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb000 ap</i>	154
A.2	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb001a ap</i>	155
A.3	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb002b ap</i>	156
A.4	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb003a av</i>	157
A.5	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb003a ap</i>	158
A.6	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb006a av</i>	159
A.7	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb006a ap</i>	160
A.8	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb007 ap</i>	161

A.9	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb008a av.</i>	162
A.10	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb008a ap.</i>	163
A.11	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb009a ap.</i>	164
A.12	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb010b av.</i>	165
A.13	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb010b ap.</i>	166
A.14	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du carbopol : <i>carb011 ap.</i>	167
B.1	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol002.</i>	170
B.2	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol003.</i>	171
B.3	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol004.</i>	172
B.4	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol005.</i>	173
B.5	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol007.</i>	174
B.6	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol008.</i>	175
B.7	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol009.</i>	176
B.8	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol010.</i>	177
B.9	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol011.</i>	178
B.10	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol012.</i>	179
B.11	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol013.</i>	180
B.12	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol019.</i>	181
B.13	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol021.</i>	182
B.14	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol023.</i>	183
B.15	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol024.</i>	184
B.16	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol025.</i>	185
B.17	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol026.</i>	186

B.18	Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol027</i>	187
E.1	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb001a</i>	202
E.2	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb002b</i>	203
E.3	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb003a</i>	204
E.4	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb006a</i>	205
E.5	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb007</i>	206
E.6	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb008a</i>	207
E.7	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb009a</i>	208
E.8	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb010b</i>	209
E.9	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le carbopol : <i>carb011</i>	210
F.1	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol002</i>	212
F.2	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol003</i>	213
F.3	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol004</i>	214
F.4	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol005</i>	215
F.5	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol007</i>	216
F.6	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol008</i>	217
F.7	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol009</i>	218
F.8	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol010</i>	219
F.9	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol011</i>	220
F.10	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol012</i>	221
F.11	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol013</i>	222
F.12	Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol019</i>	223

F.13 Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol021</i>	224
F.14 Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol023</i>	225
F.15 Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol024</i>	226
F.16 Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol025</i>	227
F.17 Évolution de la hauteur d'écoulement dans la zone uniforme avec la vitesse de défilement du tapis pour le kaolin : <i>kaol026</i>	228
F.18 Contrainte cisailante en fonction du taux de cisaillement et domaine d'incertitude sur la courbe d'écoulement du kaolin : <i>kaol027</i>	229

Liste des tableaux

1.1	Grandeurs physiques caractéristiques des laves torrentielles naturelles.	14
1.2	Grandeurs principales de laves torrentielles naturelles et ordre de grandeur des coulées modèles obtenu selon les critères de similitude.	25
3.1	Gamme de variation des paramètres d'ajustement de Herschel-Bulkley pour les échantillons de carbopol et de kaolin.	56
3.2	Tableau récapitulatif de l'incertitude sur des paramètres d'ajustement, pour le carbopol <i>carb000</i> (19 mesures).	56
5.1	Tableau récapitulatif des paramètres des essais conduits avec du carbopol : ρ est la densité du fluide, τ_c , k et n les paramètres d'ajustement du <i>rhéogramme moyen</i> , l la largeur du canal, θ la pente du canal, H désigne la technique de mesure de la hauteur, u_b la vitesse de défilement du tapis et H_N la hauteur de l'écoulement dans la zone uniforme. La mention <i>av</i> et <i>ap</i> indique si le matériau a été échantillonné avant ou après <i>le même essai</i> sur le canal.	80
5.2	Tableau récapitulatif des paramètres des essais conduits avec du kaolin : ρ est la densité du fluide, τ_c , k et n les paramètres d'ajustement du <i>rhéogramme moyen</i> , l la largeur du canal, θ la pente du canal, u_b la vitesse de défilement du tapis et H_N la hauteur de l'écoulement dans la zone uniforme. Tous les matériaux ont été échantillonnés après l'essai sur le canal (<i>ap</i>).	81
5.3	Nombres sans dimension caractéristiques des expériences réalisées avec le carbopol et le kaolin.	99
6.1	Tableau récapitulatif des essais conduits : nom du carbopol, pente du canal θ , masse volumique ρ du carbopol et paramètres d'ajustement du rhéogramme moyen pour chaque essai (τ_c , k et n).	117
6.2	Tableau récapitulatif des dimensions du champ de vision et du coefficient de conversion correspondant C : L est la longueur du champ et H est la hauteur du champ.	126
C.1	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb000</i> . . .	190
C.2	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb001a</i> . .	191
C.3	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb002b</i> . .	191
C.4	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb003a av</i> . .	191
C.5	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb003a ap</i> . .	191
C.6	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb006a av</i> . .	191
C.7	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb006a ap</i> . .	192

C.8	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb007</i> .	192
C.9	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb008a av</i> .	192
C.10	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb008a ap</i> .	192
C.11	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb009a ap</i> .	193
C.12	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb010b av</i> .	193
C.13	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb010b ap</i> .	193
C.14	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le carbopol <i>carb011</i> .	193
D.1	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol002</i> .	195
D.2	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol003</i> .	196
D.3	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol004</i> .	196
D.4	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol005</i> .	196
D.5	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol007</i> .	196
D.6	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol008</i> .	196
D.7	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol009</i> .	197
D.8	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol010</i> .	197
D.9	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol011, kaol012</i> et <i>kaol013</i> .	197
D.10	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol019</i> .	198
D.11	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol021</i> .	198
D.12	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol022</i> .	198
D.13	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol023</i> .	198
D.14	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol024</i> .	198
D.15	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol025</i> .	199
D.16	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol026</i> .	199
D.17	Tableau récapitulatif des paramètres d'ajustement pour le kaolin <i>kaol027</i> .	199
G.1	Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le <i>carbopol A</i> : $\theta = 6.7^\circ$.	231
G.2	Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le <i>carbopol B</i> : $\theta = 6.7^\circ$.	232
G.3	Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le <i>carbopol D</i> : $\theta = 14.5^\circ$.	232
G.4	Tableau récapitulatif des paramètres des essais pour le <i>carbopol E</i> : $\theta = 14.5^\circ$.	233