



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES



N° d'ordre : M2...../GC/2019

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADIMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie Chimique

Thème

Intitulé du sujet

ESSAIS ET MESURES RHÉOLOGIQUE PILOTES PAR LE
LOGICIEL RHEO3000

Présentée par

M^{elle} ELAHACENE Nour el houda

Soutenu le 30/06/2019 devant le jury composé de :

Président :	M^r GHEZZAR Redouane	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	M^r RETIEL Nouredine	Professeur	Université de Mostaganem
Rapporteur :	M^r SMAIL Bentaiba	M.A.A	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2018/2019

MERCI!

Tout d'abord, Nous tenons à remercier notre Dieu tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage pour réaliser ce travail avec succès.

Je remercie Monsieur SMAIL Bentaiba, directeur de mémoire, pour sa disponibilité, son encadrement agréable et enrichissant ainsi que ses précieux conseils dans l'aboutissement de ce projet de fin d'études.

Je remercie Professeur R.GHEZZAR pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie également Professeur N.RETIEL pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier Mme BESSAD Lila pour son aide.

L'enseignement de qualité dispensé dans le cursus Master Génie Chimique à également su nourrir mes réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle. Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs intervenants dans ce cursus.

Thank
you!

TABLE DES MATIERES

• Notations	04
• Résumé	05
• Abstract	05
• ملخص	05
• Introduction	06

CHAPITRE I : DETAILS DE LA MISE EN FONCTIONNEMENT DU RHEOMETRE

DISPONIBLE AU NIVEAU DU HALL DE GENIE CHIMIQUE

I.1 Généralités sur la Rhéologie	08
I.2 Différents Comportements Rhéologiques	08
I.2.1 Fluides Newtoniens	08
I.2.2 Fluides Non Newtoniens	09
I.2.2.1 Fluides Non Newtoniens Indépendants du Temps	09
I.2.2.1.a Fluides à Contrainte Critique	09
I.2.2.1.b Les Fluides Sans Contrainte Critique	10
I.2.2.2 Fluides Non Newtoniens Dépendants du Temps	10
I.3 Rhéométrie et Rhéomètres	11
I.3.1 Les Rhéomètres de Type Poiseuille	11
I.3.2 Les Rhéomètres de Type Couette	11
I.3.2.1 Les Rhéomètres Rotatifs à Cylindres Coaxiaux	12
I.3.2.2 Les Rhéomètres Rotatifs Cône-Plan	12
I.3.2.3 Les Rhéomètres Rotatifs Plan-Plan	13
I.4 Le Rhéomètre R / S Plus de Brookfield	14
I.4.1 Description et Installation de l'appareil	14
I.4.2 connexions de l'appareil	15
I.4.3 Principe de mesure	15
I.4.3 Procédure de mise en marche	16
I.4.3.1 Fonctionnement du clavier	16
I.4.3.2 Démarrage du Rhéomètre	17

I.4.3.3 Calibrage à zéro du Rhéomètre	17
I.4.3.4 Réglage de l'écart (entrefer)	18
I.4.2.5 Mise en place de l'échantillon	19
I.4.3.6 Procédure de Mesure et enregistrement	19
I.4.3.6.1 Mesure et enregistrement en mode manuel	19
I.3.3.6.2 Mesure et enregistrement en mode Pilotage (Rheo3000)	20
I.4.3.7 Comment utiliser le logiciel Rhéo3000 ?	21

CHAPITRE II : MISE A L'ESSAI. MESURES RHEOLOGIQUES

• Introduction	25
II.1 Essais avec un seul bloc	25
II.1.1 bloc de mesure à rotation constante	25
II.1.2 bloc de mesure à rampe de rotation	29
II.2 Essais à plusieurs blocs	31
II.1.2 bloc à rotation en rampe plus analyse par régression plus type de visualisation de données	31
II .3 Etude de la viscosité en fonction de la température	34
• Conclusion Générale	35
• Références Bibliographiques	36
• Table des Figures	37
• Annexes	39

NOTATIONS

- Notations grecques dimensionnelles

μ Viscosité dynamique newtonienne, **Pa.s**

$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$, Viscosité apparente, **Pa.s**

μ_p Viscosité plastique, **Pa.s**

$\dot{\gamma}$ Vitesse (taux) de cisaillement, **s⁻¹**

τ Contrainte de cisaillement, **Pa**

τ_c Contrainte critique lorsque la vitesse de cisaillement tend vers 0, **Pa**

ω vitesse de rotation (angulaire), **s⁻¹ ou rad/s**

- Notations latines dimensionnelles

k Consistance d'un fluide d'OSTWALD, **Pa.sⁿ**

R_p Rayon de plan, **m**

R_c Rayon de cône, **m**

h L'entrefer entre deux plans, **m**

S La surface, **m²**

F La force, **N**

T Température, **°C**

t Temps, **s**

- Exposants

n Indice d'écoulement des fluides

ABREVIATION

CSR controlled shear rate (taux de cisaillement fixe)

CSS controlled shear stress (contrainte de cisaillement fixe)

Tau-prom : le facteur de contrainte de cisaillement

K_gamma : le facteur de vitesse de cisaillement

ملخص

الهدف من عملنا هو بدء تشغيل جهاز Brookfield R / S plus Rhéomètre المتوفر في مختبرنا في الجزء الأول، نحن مهتمون بوصف المكونات المختلفة لجهاز القياس. العنصران الأساسيان هما: نظام القياس الريولوجي (المتنقل) والجزء الإلكتروني (رأس جهاز القياس). تم استخدام جهاز القياس في الدراسة الريولوجية لعدة أنواع من السوائل [السوائل النيوتونية (العسل)، السوائل غير النيوتونية (المايونيز والكاتشب والزيادي)]. يتم إجراء التجربة باستخدام البرنامج (Rhéo 3000) المرفق مع الجهاز. الكلمات المفتاحية: جهاز القياس R / S plus، نظام القياس، رأس المقياس، دراسة ريولوجية، مائع، نيوتوني، غير نيوتوني، برمجيات.

RESUME

Le but de notre travail c'est la mise en marche du rhéomètre R /S plus de Brookfield disponible dans notre laboratoire.

Dans une première partie on s'intéresse à décrire les différents composants du rhéomètre. Les deux éléments essentiels sont : le système de mesure rhéologique (mobile) et la partie optoélectronique (tête du rhéomètre).

Le rhéomètre a été utilisé pour faire l'étude rhéologique de plusieurs types de fluides [fluide newtonien (miel), fluides non newtonien (mayonnaise, ketchup et yaourt)]. L'expérimentation est réalisée en utilisant le logiciel (Rhéo 3000) fourni avec l'appareil.

Mots clés : rhéomètre R /S plus, système de mesure, tête du rhéomètre, l'étude rhéologique, fluide, newtonien, non newtonien, logiciel,

ABSTRACT

The purpose of our work is to start the Brookfield R / S plus Rheometer available in our laboratory.

In a first part we are interested in describing the different components of the rheometer. The two essential elements are: the rheological measurement system (mobile) and the optoelectronic part (rheometer head).

The rheometer has been used for the rheological study of several types of fluids [Newtonian fluid (honey), non-Newtonian fluids (mayonnaise, ketchup and yoghurt)]. The experiment is performed using the software (Rhéo 3000) supplied with the device.

Keywords : rheometer R / S plus, measurement system, rheometer head, rheological study, fluid, Newtonian, non-Newtonian, software.

Introduction

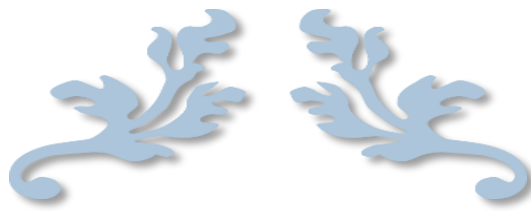
Pour le transport et la manipulation des fluides on a besoin de connaître un certain nombre de leurs propriétés, essentiellement leurs propriétés rhéologiques. La détermination de ces propriétés relève d'une discipline qui appartient à la mécanique des fluides et qu'on appelle *rhéologie*.

Cette discipline est connue comme étant l'étude de l'écoulement et de la déformation des fluides réels, sous l'effet de contraintes qui leur sont appliquées.

Pour accéder à ces propriétés, on fait appel à des techniques de mesures expérimentales qui relèvent de ce qui est appelée *rhéométrie*. Les appareils utilisés sont appelés *rhéomètres*. Un rhéomètre permet de mesurer les propriétés rhéologiques des fluides telles que la viscosité, l'indice d'écoulement, la consistance, la vitesse de cisaillement, etc. Il existe plusieurs types de rhéomètres. On cite les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux, les rhéomètres rotatifs cône-plan, et les rhéomètres rotatifs plan-plan.

Le rhéomètre disponible au niveau du hall de génie chimique est un *rhéomètre rotatif* qui peut supporter aussi bien le système plan-plan que le système cône-plan. Son appellation commerciale est « *rhéomètres R /S plus de Brookfield* ».

L'objectif fixé dans le présent travail est de mettre cet appareil en marche, de comprendre puis expliquer d'une manière claire ses potentialités. Et surtout, de mener des essais d'études rhéologiques.



CHAPITRE II

DETAILS DE LA MISE EN FONCTIONNEMENT DU RHEOMETRE DISPONIBLE
AU NIVEAU DU HALL DE GENIE CHIMIQUE



I.1 généralités sur la rhéologie

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des matériaux sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, etc...). Ou de formage de pièces (en métallurgie, en plasturgie, etc. ...) nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu. Le mot rhéologie vient des termes grecs « rhéo », qui signifie écoulement, et « logos », qui désigne l'étude d'un domaine [2].

Elle s'intéresse à l'observation aux échelles microscopique et nanoscopique (réarrangement des atomes ou des molécules, leurs mouvements relatifs, ou leurs différences de taille) ainsi qu'à l'élaboration d'équations pouvant décrire la déformation de ces matériaux.

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- ❖ **rhéologie expérimentale** : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation)
- ❖ **rhéologie structurale** : explication des comportements à partir de la structure du matériau
- ❖ **rhéologie théorique** : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

I.2 Différents comportements rhéologiques

I.2.1 Fluides Newtoniens

Un fluide est dit Newtonien si sa viscosité est indépendante de la contrainte appliquée. Cette catégorie de fluides obéit à la loi de Newton :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (I.1)$$

dont la représentation graphique donne la courbe d'écoulement (fig.I.1).

Le rhéogramme $\tau = f(\dot{\gamma})$ d'un tel fluide est donc une droite passant par l'origine, de pente $tg\alpha = \mu$. C'est en général le cas des gaz et des liquides usuels.

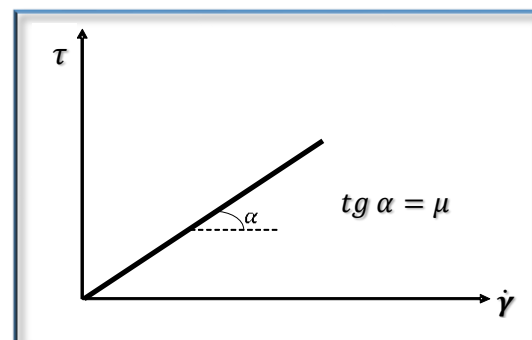


Figure I.1 : Courbe d'écoulement ou rhéogramme

La viscosité néanmoins dépend d'autres facteurs tels que la **température** et la **pression**. Exemples de fluides newtoniens : eau, miel, sirop de sucre de canne...

I.2.2 Fluides non Newtoniens

Dans un fluide non-Newtonien, la *viscosité* dépend de la vitesse de cisaillement. Les fluides non newtoniens sont classés en deux catégories : **les fluides indépendants du temps** et **les fluides dépendants du temps**.

I.2.2.1 Fluides non Newtoniens indépendants du temps

Ce type de fluide obéit à la relation : $\tau = \mu_a \dot{\gamma}$ (I.2)

Où le facteur de proportionnalité μ_a est une valeur dépendant de $\dot{\gamma}$, appelée **viscosité apparente [3]**.

Il existe deux catégories principales de fluide indépendant du temps : Les fluides à contrainte critique et Les fluides sans contrainte critique.

I.2.2.1.a Fluides à contrainte critique

Les fluides à contrainte critique sont des fluides plastiques et leur déformation ne commence qu'à partir d'une certaine valeur de la contrainte τ_c (seuil d'écoulement) et la relation d'écoulement de ces fluides s'écrit :

$$\begin{aligned} \tau - \tau_c &= \mu_a \dot{\gamma}^n & \text{si } \tau \geq \tau_c \\ \dot{\gamma} &= 0 & \text{si } \tau < \tau_c \end{aligned} \quad (\text{I.3})$$

Si $n = 1$, le fluide est appelé fluide de **Bingham** avec $\mu_a = \mu_p$ connue sous le nom de viscosité plastique. Sa courbe d'écoulement est représentée sur la figure I.2.

Au-delà du seuil d'écoulement τ_c le liquide se comporte comme un liquide Newtonien.

Les exemples les plus classiques sont Les peintures à l'huile, les margarines, certaines graisses, dentifrice.

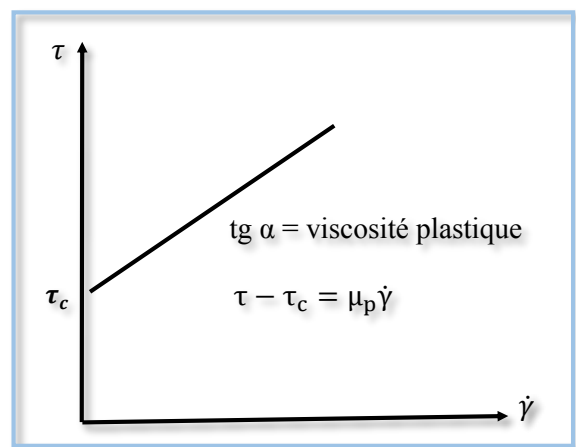


Figure I.2 : Rhéogramme d'un fluide de Bingham

Si $n \neq 1$, le fluide est appelé fluide Plastique, obéissant à la relation d'HERSCHEL-BULKEY : $\tau - \tau_c = k\dot{\gamma}^n$

k est appelée «consistance», et n l'indice d'écoulement.

Au-delà du seuil d'écoulement τ_c le liquide se comporte comme un liquide plastique fluidifiant (fig. I.3)

I.2.2.1.b Les fluides sans contrainte critique

OSTWALD a proposé pour représenter les courbes d'écoulement de ces fluides la relation dite loi d'OSTWALD-DE WAELE : $\tau = k\dot{\gamma}^n$ (I.4)

Si $0 < n < 1$, le fluide est appelé pseudo-plastique ou rhéofluidifiant. Sa courbe d'écoulement est représentée sur la figure I.4. Les principaux fluides présentant un comportement rhéofluidifiants sont : Le savon, les suspensions de détergent, la mayonnaise, les ciments, les pâtes à papier, le ketchup, le magma et certaines peintures.

Si $n > 1$, le fluide est appelé fluide dilatant ou rhéoépaississant. Sa courbe d'écoulement est représentée sur la figure I.5.

C'est le cas par exemple d'une suspension concentrée de maïzena.

I.2.2.2 Fluides non Newtoniens dépendants du temps

La viscosité apparente (μ_a) mesurée, pour ce type fluides, varie avec le temps.

On distingue deux grandes catégories :

- Les fluides thixotropes
- Les fluides antithixotropes

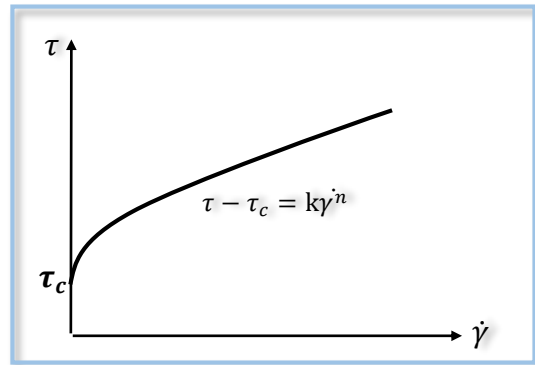


Figure I.3 : Rhéogramme d'un fluide plastique

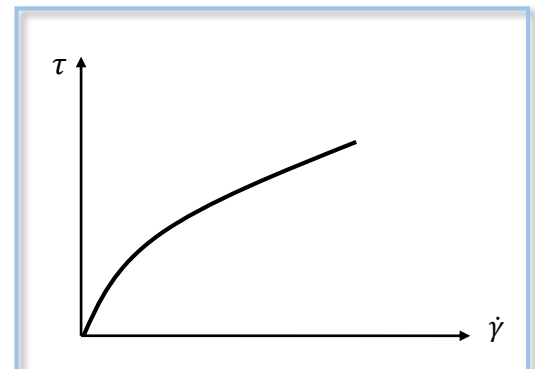


Figure I.4 : Rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant

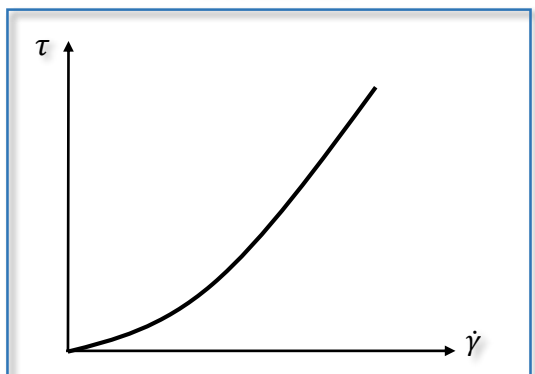


Figure I.5 : Rhéogramme d'un fluide rhéoépaississant

1.3 rhéométrie et rhéomètres

La rhéométrie désigne la technique expérimentale permettant de déterminer les propriétés rhéologiques des matériaux (viscosité, l'indice d'écoulement, ect.).

Un certain nombre de tests rhéométriques peuvent être effectués pour déterminer les propriétés d'écoulement et de viscoélasticité d'un matériau. Ils dépendent en grande partie du type de rhéomètre utilisé et de ses capacités [4].

Un rhéomètre est un appareil de laboratoire permettant de faire des mesures rhéologiques d'un fluide en lui appliquant une contrainte de cisaillement. Généralement de faible dimension caractéristique (très faible inertie mécanique du rotor), cet appareil permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée[5].

Il est plus sophistiqué pour une analyse rhéologique et plus cher qu'un viscosimètre. Il permet de connaître les grandeurs fondamentales tels que le taux de cisaillement, la contrainte de cisaillement $\tau(t)$ et viscosité. Les mesures qu'il donne peuvent être comparées avec celles obtenues par d'autres techniques.

Ces rhéomètres sont classés en deux catégories. Les rhéomètres de type Poiseuille et les rhéomètres de type Couette (que nous détaillons dans la suite)

1.3.1 Les rhéomètres de type Poiseuille

Dans ce genre de rhéomètre, l'écoulement est de type Poiseuille. Il s'agit essentiellement de viscosimètre (mesure de viscosité).

1.3.2 Les rhéomètres de type Couette

Dans ce genre de rhéomètre, l'écoulement est de type Couette. La substance est cisailée entre deux surfaces solides, l'une fixe, l'autre mobile. On distingue trois types :

I.3.2.1 Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux

Le fluide se trouve en écoulement de cisaillement entre deux cylindres coaxiaux, l'un à l'arrêt, l'autre en mouvement de rotation (rotor).

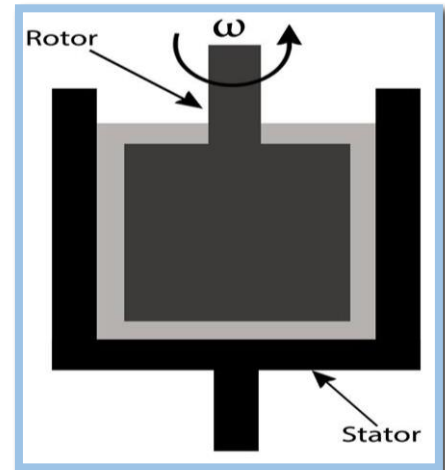
Le cylindre intérieur offre une grande surface de contact pour augmenter le couple résistant et donc la sensibilité de l'appareil (fig. I.6). Cependant, l'inertie mécanique est élevée (à vitesse élevée, des instabilités peuvent apparaître) ce qui limite la gamme de taux de cisaillement accessible.

Ce type est le plus utilisé, de très bonne précision, mais adapté uniquement aux fluides de faible viscosité car le volume d'échantillon nécessaire est important et cela est mal adapté aux fluides de forte viscosité, en plus du remplissage de la cellule de mesure qui peut être délicat, en particulier pour les fluides consistants.

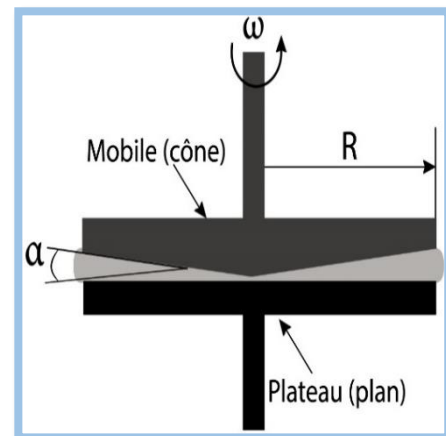
I.3.2.2 Les rhéomètres rotatifs cône-plan

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre un cône et un plan. Le cône est caractérisé par son rayon R et par l'angle α (fig. I.7). Il est fixé sur la partie tournante du rhéomètre, qui lui confère une rotation par rapport à son axe avec une vitesse angulaire constante ω .

L'angle α est très faible ($\leq 4^\circ$) pour obtenir un taux de cisaillement vertical constant dans le volume de mesure.



FigureI.6 : Rhéomètre à cylindres coaxiaux



FigureI.7 : Rhéomètre cône-plan

1.3.2.3 Les rhéomètres rotatifs plan-plan

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre deux plans parallèles caractérisés par leur rayon R et l'entrefer h entre ces deux plans (fig. I.8). L'un des plans est à l'arrêt, l'autre est en rotation à la vitesse angulaire ω .

Cette géométrie est mieux adaptée pour les suspensions.

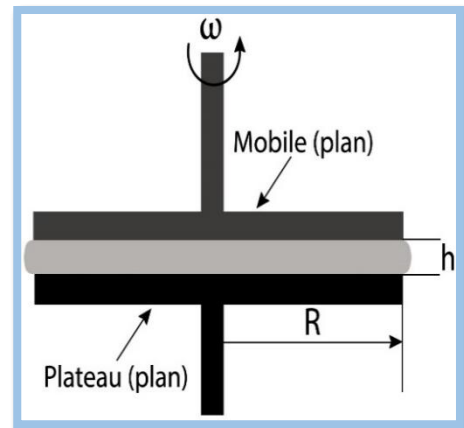


Figure I.8 : Rhéomètre plan-plan

Remarque.

Le rhéomètre utilisé dans notre laboratoire est de type plan-plan appelée R /S plus de Brookfield.

I.4 Le rhéomètre R / S plus de Brookfield

I.4.1 Description et Installation de l'appareil



Figure I.9 : figure et schémas de principe de rhéomètre R / S plus

Le rhéomètre se compose de :

1. Tête de mesure avec clavier contrôlant et écran à affichage digital
 2. Axe de rotation muni d'une broche où se fixe le mobile
 3. Mobile
 4. Plateau immobile
- } système d'application du cisaillement
5. Bague micrométrique (permet de fixer l'écart entre le mobile et la plaque fixe)
 6. Levier (permet de faire baisser la tête de mesure)
 7. Indicateur à cadran (permet de vérifier le réglage à zéro)

I.4.2 connexions de l'appareil

Le rhéomètre R / S plus doit être placé sur une surface plane, telle qu'un établi de laboratoire. Il devrait y avoir assez de place pour manipuler facilement l'instrument. Il est muni de connexions situées à l'arrière de la tête du rhéomètre (fig. I.10) pour le relier :

- à un dispositif de contrôle de température. C'est un régulateur de température à effet Peltier P-TS (fig.I.11) permettant de chauffer l'échantillon à la température désirée (voir détails annexe A.1).
- à une imprimante pour imprimer les résultats des mesures effectuées.
- à un micro-ordinateur pour pouvoir le piloter au moyen du logiciel rhéo3000 fournit avec l'appareil.

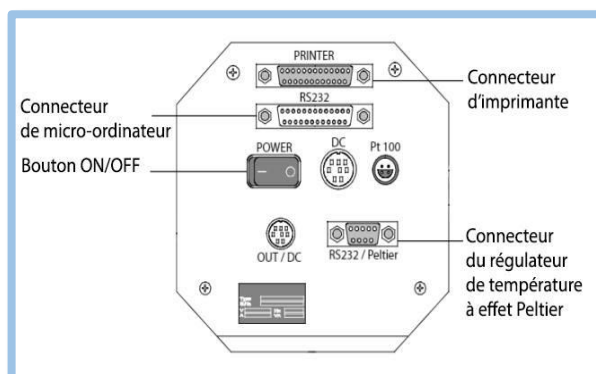


Figure I.10 : Connexions du rhéomètre

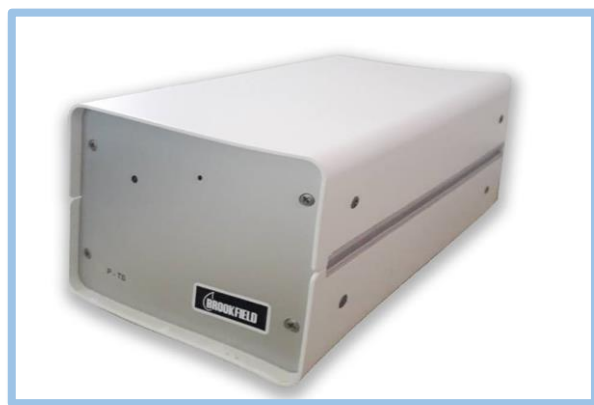


Figure I.11 : régulateur de température effet Peltier P-TS

I.4.3 Principe de mesure

Le rhéomètre R / S plus est un rhéomètre rotatif à contrainte contrôlée. Il permet une étude rhéologique complète des fluides Newtoniens et non Newtoniens. On peut l'utiliser pour le contrôle de la qualité, le développement de produits et la recherche.

Le mobile est mis en rotation à une vitesse ω_0 en lui exerçant un couple C . Un mouvement de cisaillement est créé au sein de l'échantillon, qui se décompose alors en couches successives dont la vitesse de rotation varie de ω_0 pour la couche en contact avec le mobile à $\omega = 0$ pour la couche en contact avec le plateau immobile. Le mouvement relatif des couches fait apparaître en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ et une contrainte de cisaillement τ [6]

Ce type de rhéomètre utilise un système d'entraînement dynamique de haute précision avec codeur optique pour effectuer les mesures.

Il existe deux types de mesure : mesure de rotation sous taux de cisaillement fixé (controlled shear rate CSR) ou sous contrainte de cisaillement fixée (controlled shear stress CSS). Les mesures CSR et CSS peuvent être effectuées manuellement à l'aide du clavier situé sur le panneau avant ou avec le logiciel Rhé3000.

1.4.3 Procédure de mise en marche

1.4.3.1 Fonctionnement du clavier

La manipulation du clavier est assurée à l'aide de six touches situées en bas de l'écran. Leurs fonctions sont détaillées sur la figure (I.12).

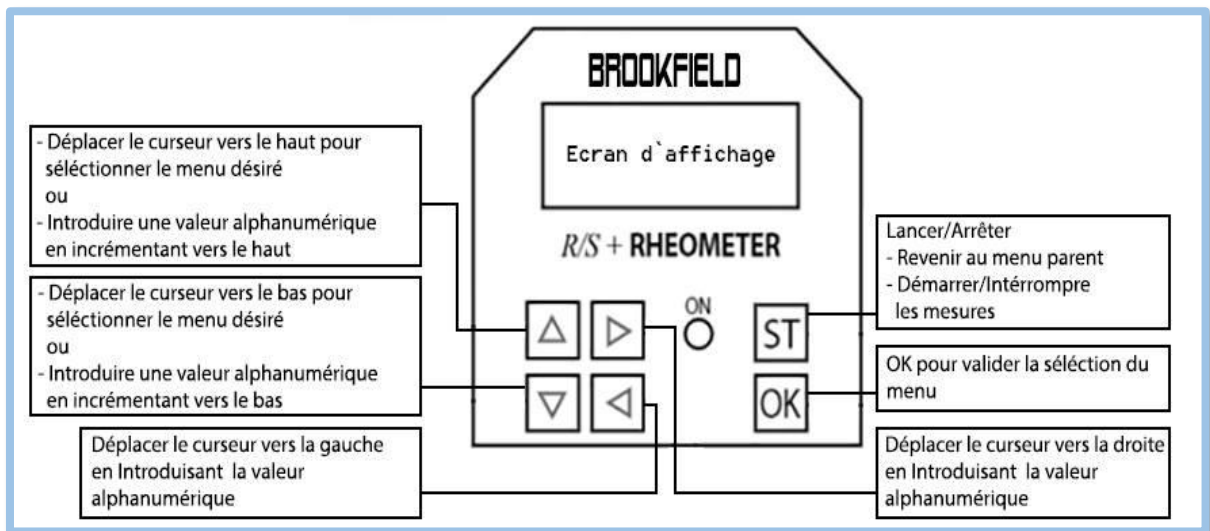
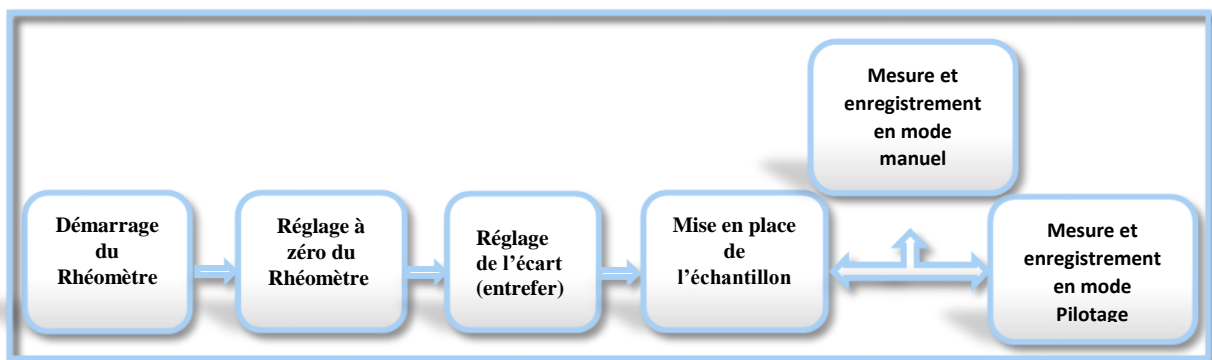


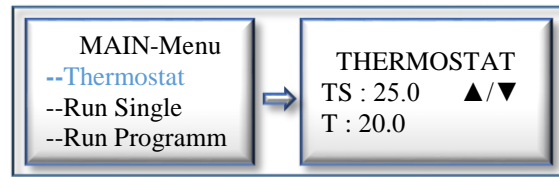
Figure I.12 : clavier du rhéomètre et ces fonctions

La procédure de mise en marche peut être résumée sur le schéma ci-dessous.



I.4.3.2 Démarrage du Rhéomètre

Allumer le rhéomètre et le régulateur de température. Régler le contrôleur à la température désirée en cliquant sur le menu thermostat (fig.I.13) puis, laisser le rhéomètre en marche pendant au moins 10 minutes.

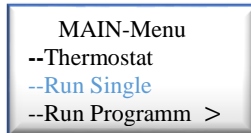


FigureI.13 : Réglage de température

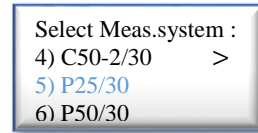
I.4.3.3 Calibrage à zéro du Rhéomètre

- Faire fonctionner le rhéomètre à 100 tr / min pendant 30 minutes (sans le mobile). Pour ceci, on procède comme suit :

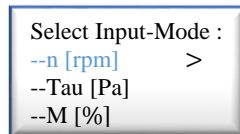
1. Sélectionner «Run Single» dans le menu principal. Ok



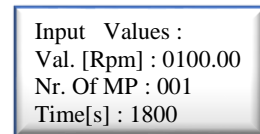
2. Sélectionner le mobile (voir détails Annexe A.2) approprié dans le sous-menu (SelectMeas.system).Ok



3. Sélectionner n [Rpm] dans le menu (Select Input-Mode).Ok

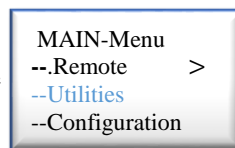


4. Introduire les valeurs dans le menu (Input Values).Ok

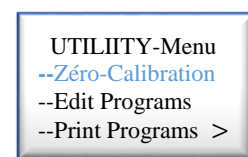


- Abaisser la tête du rhéomètre à l'aide du levier et la broche de fixation du mobile.

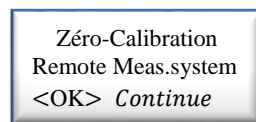
5. Sélectionner «Utilities» dans le menu principal. Ok



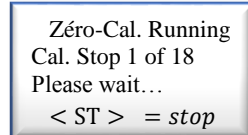
6. Sélectionner l'option Calibrage du zéro dans le menu« UTILITY-Menu ». Ok



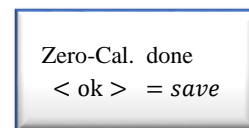
7. appuyer sur le bouton .Ok



8. appuyer encore une fois sur le bouton .Ok



9. Lorsque la procédure de calibrage du zéro est réussie, la tête du rhéomètre affiche un message « Appuyez sur la touche ok pour enregistrer les informations »



I.4.3.4 Réglage de l'écart (entrefer)

Avant de régler l'écart, on doit procéder au réglage au zéro de la bague du micromètre :

- Soulevez la tête du rhéomètre à l'aide du levier. Fixer le mobile (désigné dans le système de mesure) en le glissant à l'intérieur de la broche (avec précaution).
- Desserrer la vis à six pans creux de réglage se trouvant au milieu du mobile (fig.I.14) à l'aide d'une clé à six pans. Ce qui permet à celui-ci de bouger librement le long de son arbre (de haut en bas).
- Abaisser la tête du rhéomètre de sorte que le bas du mobile soit en contact avec la plaque. Laisser système se réchauffer pendant quelques minutes.

La bague du micromètre dispose de deux échelles (fig.I.15).

- tournez la bague du micromètre jusqu'à ce que la graduation 0 horizontale soit confondue avec la graduation 0 verticale (fig.I.16).

Abaissez la tête du rhéomètre de sorte que le mobile entre en contact avec le plateau.

- Tournez manuellement l'indicateur à cadran (fig.I.17) pour ramener l'aiguille sur le zéro.
- déplacer la tête du rhéomètre de haut en bas pour vérifier que l'aiguille de l'indicateur revient toujours à zéro.
- Abaissez de nouveau la tête du rhéomètre et la maintenir dans cette position et serrer la vis à six pans creux de réglage du mobile.
- soulever la tête du rhéomètre, fixer l'écart désiré à l'aide de la bague micrométrique en la tournant dans le sens antihoraire (Chaque division du comparateur correspond à 0,01 mm ou 10 μ m). abaisser de nouveau la tête du rhéomètre.



Figure I.14 : mobile

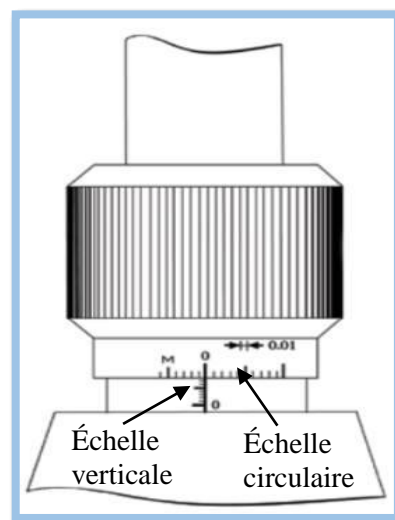


Figure I.15 : les échelles de la bague du micromètre



Figure I.16 : réglage au zéro de la bague du micromètre

Remarque.

L'écart pour le système **cône / plan** est compris entre 0,04 et 0,06 mm. La distance standard dans un système de mesure **plan / plan** est de 1 mm ; le fonctionnement est possible dans la plage de 0,3 à 3 mm en fonction des propriétés du fluide.

Le rhéomètre doit être fourni avec un jeu de 9 mobiles (Voir annexe A.2). Notre rhéomètre n'a été fourni qu'avec un seul mobile (plan).



Figure I.17 : l'indicateur à cadran

I.4.2.5 Mise en place de l'échantillon

- Relever la tête du rhéomètre, à l'aide d'une spatule non métallique, placer l'échantillon sur le plateau du rhéomètre directement sous le mobile.
- Abaisser la tête du rhéomètre sur l'échantillon. l'indicateur à cadran doit indiquer le même écart établi.
- Couper l'échantillon en excès à partir du bord avec une spatule non métallique et attendre 5 minutes ou plus pour permettre à l'échantillon de se réchauffer.

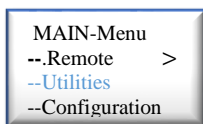
I.4.3.6 Procédure de Mesure et enregistrement

Deux modes de mesure sont possibles : le mode manuel et le mode Piloté par un logiciel (Rheo3000).

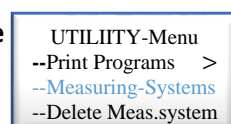
I.4.3.6.1 Mesure et enregistrement en mode manuel

1. introduction des constantes du mobile

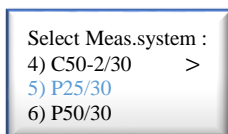
A. Sélectionner «Utilities» dans le menu principal. Ok



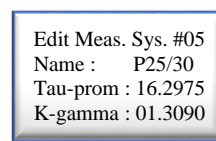
B. sélectionner l'option« **Système de mesure** » dans le sous-menu (UTILITY-Menu).Ok



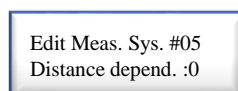
C. Sélectionner le mobile approprié dans le sous-menu(SelectMeas.system) .Ok



D. introduire les valeurs des 2 constantes Ta u-prom et K_gamma du mobile (voir Annexe A.2). Ok



E. taper 0 devant Distance depend. Ok



2. Mesure unique

A. Sélectionner «**Run Single**» dans le menu principal. Ok

```
MAIN-Menu
--Thermostat
--Run Single
--Run Programm >
```

B. Sélectionner le mobile approprié dans le menu (Select Meas.system).Ok

```
Select Meas.system :
4) C50-2/30 >
5) P25/30
6) P50/30
```

C. Sélectionner la méthode de mesure (par exemple M [%]) dans le menu (Select Input-Mode).Ok

```
Select Input-Mode :
--n [rpm] >
--Tau [Pa]
--M [%]
```

D. Introduire les 3 valeurs dans le menu (Input Values) (Voir annexe A.3).Ok

```
Input Values :
Val. [Rpm] : 0250.00
Nr. Of MP : 001
Time[s] : 0120
```

E. L'indication du rhéomètre où les points de mesure seront écrits. ST

```
Output of MPs to :
--no output-device
--Memory
<[ ]> menu <ST >
```

F. L'affichage de l'instrument lorsque une mesure est lancée.

```
Program running
Wail for 1.MP
#01
```

Dans le mode manuel, le rhéométrie peut fonctionner en Run Single ou en Run Programm

Sélectionner «**Run Programm**» dans le menu principal

```
MAIN-Menu
--Thermostat
--Run Single
--Run Programm >
```

1.4.3.6.2 Mesure et enregistrement en mode Piloté par un logiciel (Rheo3000)

Dans ce mode, toutes les fonctions du rhéomètre sont contrôlées par un micro-ordinateur via le logiciel Rheo 3000 (fourni avec l'appareil).

Le logiciel Rheo3000 détermine les tâches qui doivent être effectuées par le rhéomètre. Ça peut être des tâches simples telles que mesurer la viscosité en fonction du temps ou en fonction de la température, jusqu'à effectuer une analyse complète et automatisée du comportement d'un fluide grâce aux modèles rhéologiques qui sont inclus dans le logiciel tels que : Bingham, Ostwald, Herschel-Bulkle .Une fois les mesures réalisées, les résultats sont enregistrés dans une base de données pour une utilisation ultérieure.

Il est clair que le mode piloté offre beaucoup plus de possibilités que le mode manuel.

I.4.3.7 Comment utiliser le logiciel Rhéo3000 ?

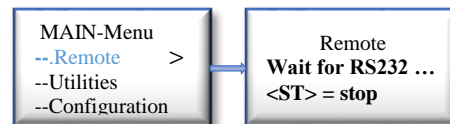
Après l’avoir installé, l’icône du logiciel apparait sur le bureau portant l’étiquette Rhéo3000v1.2.

Pour travaille avec le logiciel, le rhéomètre doit être connecte avec le micro par l’intermédiaire de prise de connexion.

1. Aller sur le menu principal de rhéomètre et sélectionner "Remote» et l’écran affiche les informations (fig.I.18).

2. En double cliquant sur cette icône, on ouvre la fenêtre principale du logiciel (fig.I.19), utilisée pour contrôler et gérer tous les tests, analyses et autres fonctions. Cette fenêtre contient :

- une barre de menu principal (**Document, Imprimer, Affichage, Configuration, Fenêtre, Outils et Aide**) ;
- une barre d’outils (**Nouveau, Ouvert, Ouvrir le programme pour exécution, Enregistrer, Imprimer, Aperçu avant impression, Aide, Suivi de l’appareil, Afficher les donnees de mesure, Editer la base donnée mesurées, Exporter les données mesurées de la base de données et Importer une donnée mesurée dans la base de données**) ;
- une barre des blocs (**blocs de mesure, bloc d’analyse et bloc généraux**)
- une zone de travail
- une barre d’état sur laquelle sont affichées les informations relatives à la dernière action i[7].



FigureI.18 : Réglage du mode



Figure I.19 : fenêtre principale deRheo3000

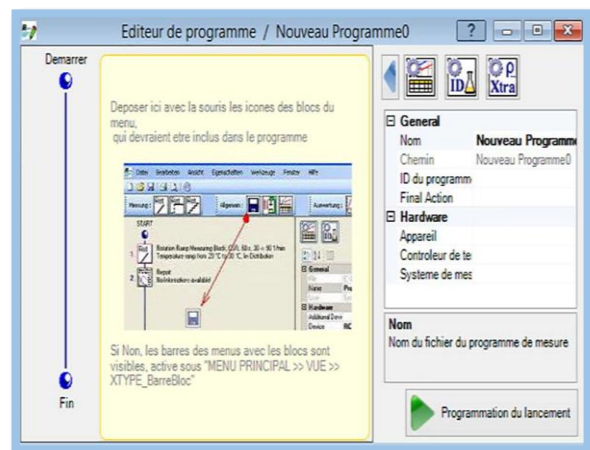


Figure I.20 : fenêtre l’éditeur de programme

Le travail commence par ouvrir un éditeur de programme de mesure :

1. aller sur le menu **Document** cliquer sur **Nouveau** et sélectionner **Programme de mesures** ou bien aller directement sur la barre d'outils qui se trouve juste en dessous et sélectionner le symbole le plus à gauche en forme de feuille blanche (fig.I.20). cette fenêtre est divisée en deux sections. La section de gauche est réservée à l'utilisateur pour éditer son programme de mesure, et la section de droite contient les propriétés du programme. Une fois le programme de mesure édité. Cliquer sur **programmation du lancement** qui se trouve en bas à droite de la fenêtre. Une nouvelle fenêtre s'ouvre (fig.I.21) où figure le nom de l'appareil, le nom du mobile utilisé et le nom du contrôleur de température.

2. appuyer sur le bouton **Démarrer** situé au milieu. Peu de temps après, la fenêtre d'affichage des résultats de mesure (fig. I.22) s'ouvre. Tous les points de mesure entreront dans cette fenêtre un par un.

Remarque.

Un programme de mesure comprend un ou plusieurs blocs. Chaque bloc contient la configuration d'une section ou d'une tâche partielle. Les blocs sont classés de «début» à «fin» dans l'ordre du traitement suivi.

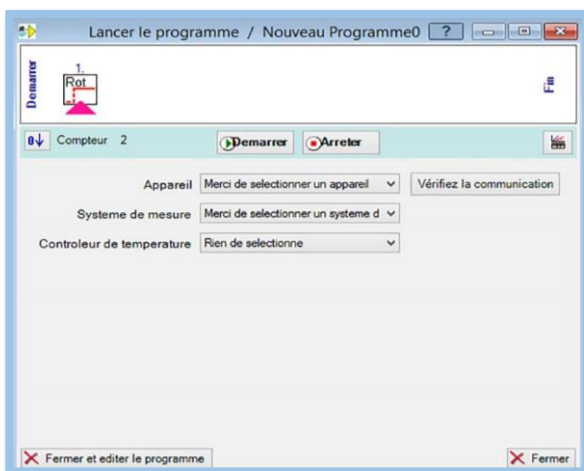


Figure I.21 : fenêtre d'exécution

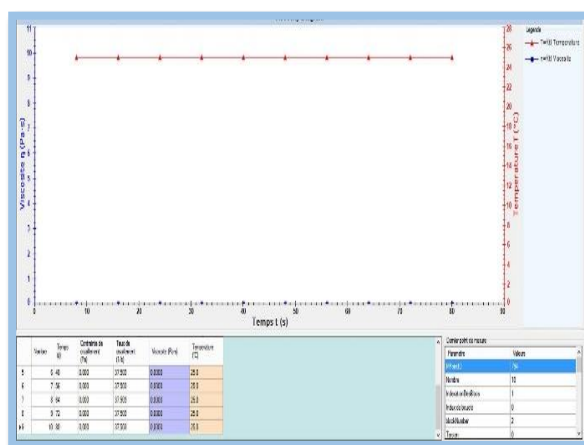


Figure I.22 : fenêtre d'affichage des résultats de mesure

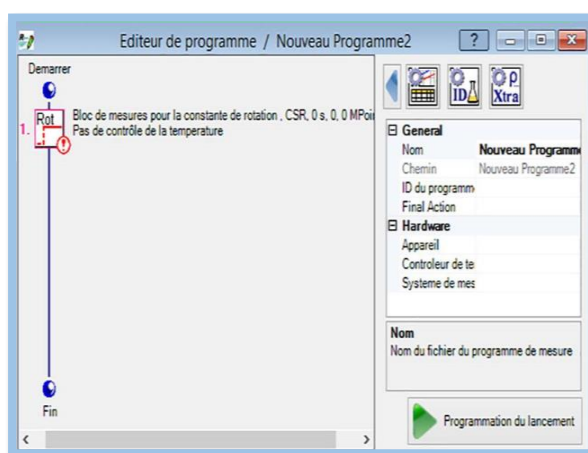


Figure I.23 : fenêtre de terrage du bloc de test

- Comment éditer un programme de mesure ?

Editer un programme de mesure requiert un minimum de connaissances en rhéologie.

1. choisir le bloc de mesure approprié et le faire descendre (fig.I.23) dans la surface gauche de l'éditeur de programme (à l'aide de la souris, double cliquer et faire glisser le bloc). Compléter le programme avec la même procédure.

2. Ouvrir chaque bloc du programme (en double cliquant dessus) et renseigner la fenêtre correspondante (fig.I.24).

3. Fermer la fenêtre en cliquant sur Ok.

4. Aller sur la surface droite de l'éditeur et renseigner toutes les rubriques (fig.I.25).

5. Enregistrer le programme en cliquant sur l'icône **enregistrer** dans la barre d'outils ou bien aller sur le menu **Document** et cliquer sur **Stocker**.

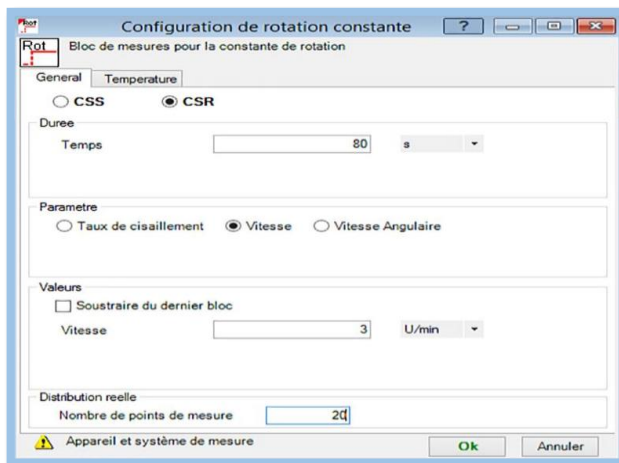


Figure I.24 : fenêtre du boîte de dialogue

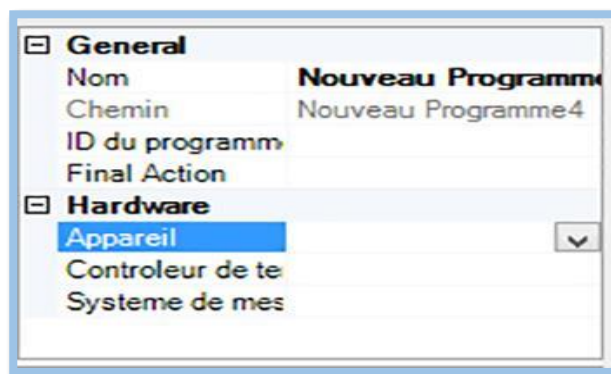
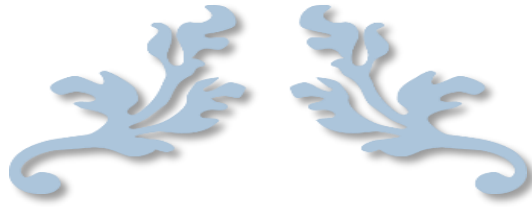


Figure I.25 : fenêtre de sélection du L'appareil et le mobile

Remarque.

Lors de la toute première utilisation du rhéomètre, il est nécessaire de procéder un étalonnage pour s'assurer qu'il fonctionne de manière correcte.

Cet étalonnage est réalisé en utilisant des fluides étalant (de viscosité dynamique connue), fournit avec l'appareil. La différence entre la valeur mesurée et la valeur indiquée doit être inférieure à 3%. Chaque mobile a son produit étalant propre.



CHAPITRE II

MISE A L'ESSAI. MESURES RHEOLOGIQUES



Introduction

Lorsqu'on exerce sur un fluide au repos une force de frottement tangentielle F , il se crée au sein du fluide un mouvement (écoulement). Les différentes couches de fluide se déplacent dans le sens de la force F mais à des vitesses différentes. Un gradient de vitesse transversal s'établit au sein du fluide provoquant une déformation du fluide (un cisaillement).

Le rapport de F à la surface S du fluide sur laquelle s'exerce tangentiellement cette force est appelé **contrainte de cisaillement** τ . Le gradient transversal de vitesse longitudinale qui est une mesure de la déformation que subit le fluide est appelé **taux de cisaillement** $\dot{\gamma}$.

Chaque fluide est caractérisé par un couple $(\tau, \dot{\gamma})$. Leur rapport donne la viscosité μ du fluide. Le principe de base de tout rhéomètre consiste à exercer sur un échantillon fluide une contrainte de cisaillement et à mesurer le taux de cisaillement provoqué par cette action.

II.1 Essais avec un seul bloc

Les fluides que nous avons étudiés sont : le miel, la mayonnaise, le ketchup et le yaourt.

Le logiciel présente les résultats des essais, dans un premier lieu, sous forme de $\mu = f(t)$.

A partir de ce diagramme, il est possible de représenter les résultats sous d'autres formes :

$\dot{\gamma} = f(t)$, $\mu = f(\dot{\gamma})$ et $\mu = f(\tau)$.

II.1.1 bloc de mesure à rotation constante

Le mobile exerce une contrainte de cisaillement τ fixe pendant une durée choisie. L'appareil mesure la déformation (taux de cisaillement $\dot{\gamma}$) de l'échantillon à intervalle de temps régulier.

Nous représentons ci-dessous les résultats de mesure sous forme de quatre diagrammes.

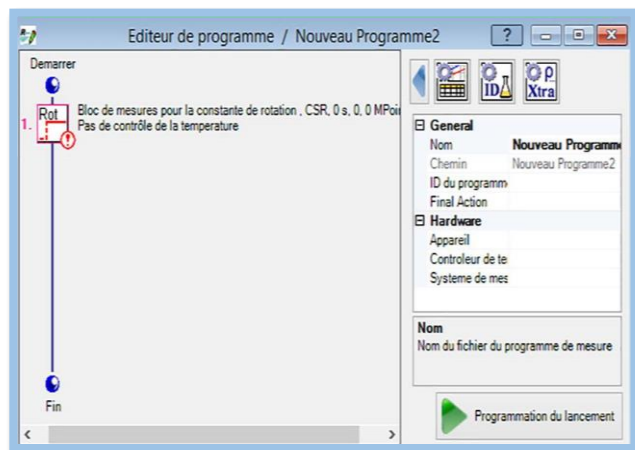
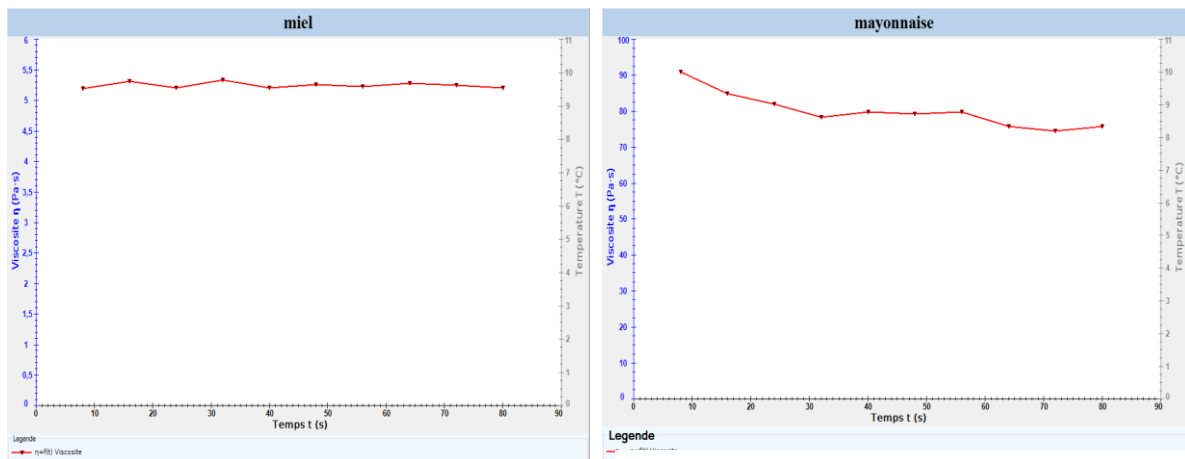


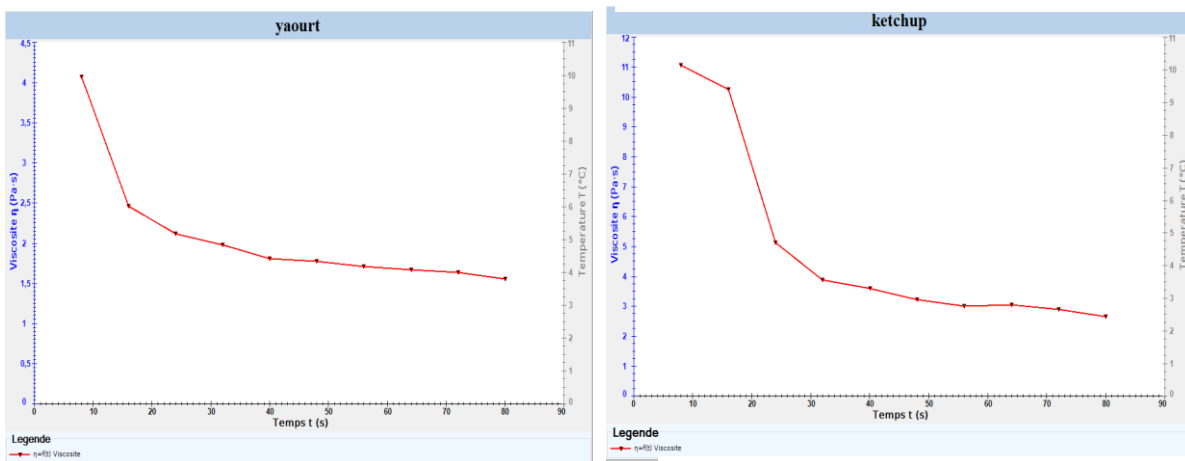
Figure II.1 : Essais avec un seul bloc (mesure à rotation constante)

- Diagramme $\mu = f(t)$



(a) : Miel, $\tau = 25 Pa$, $T = 25^{\circ}C$

(b) : Mayonnaise, $\tau = 150 Pa$, $T = 25^{\circ}C$



(c) : yaourt, $\tau = 17 Pa$, $T = 25^{\circ}C$

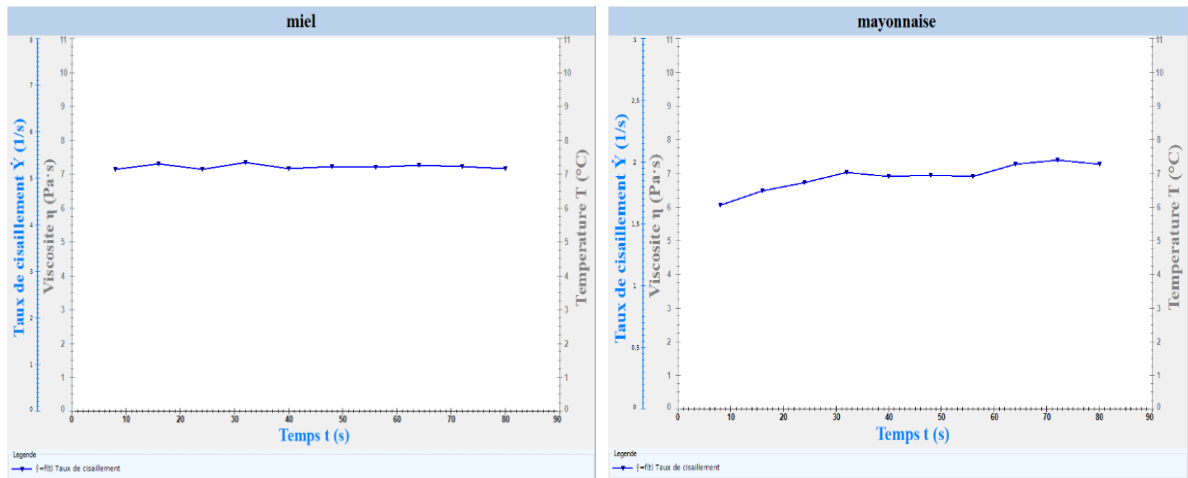
(d) : ketchup, $\tau = 40 Pa$, $T = 25^{\circ}C$

Figure II.2 : Diagrammes $\mu = f(t)$

Interprétation

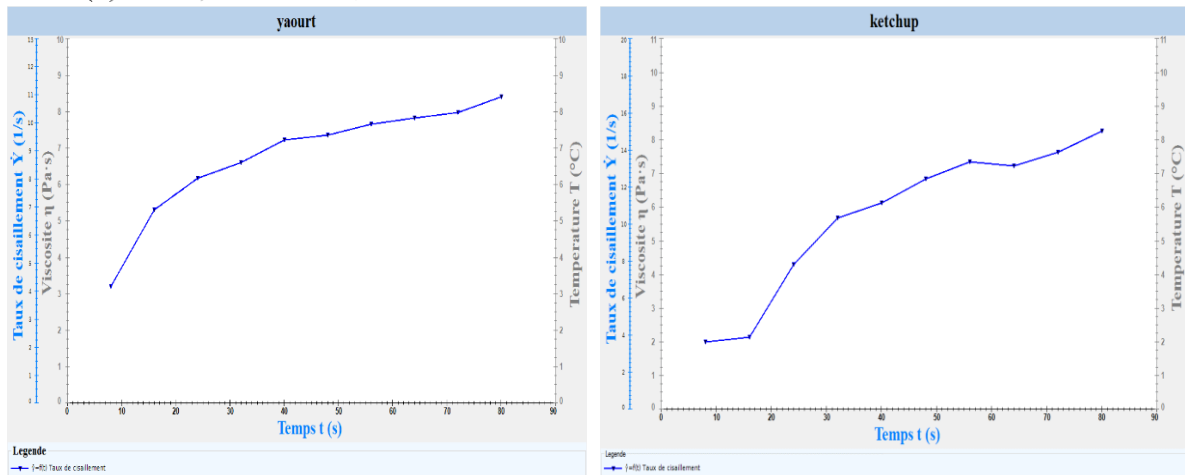
Concernant le miel, sa viscosité reste constante en fonction de temps, mais pour les autres fluides (mayonnaise, yaourt et ketchup), elle diminue. Pour les deux derniers, elle diminue même fortement.

- Diagramme $\dot{\gamma} = f(t)$



(a) : Miel, $\tau = 25 Pa, T = 25^{\circ}C$

(b) : Mayonnaise, $\tau = 150 Pa, T = 25^{\circ}C$



(c) : yaourt, $\tau = 17 Pa, T = 25^{\circ}C$

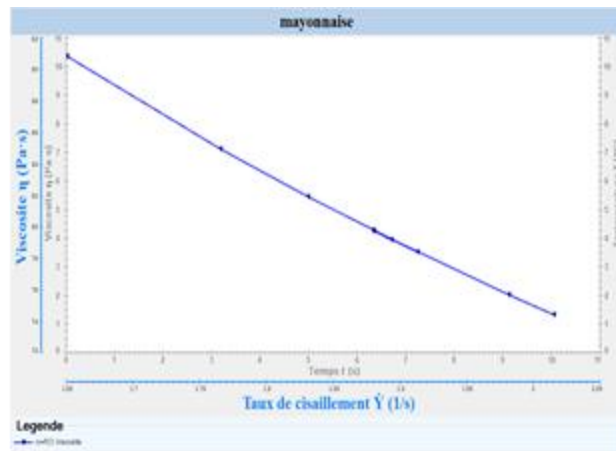
(d) : ketchup, $\tau = 40 Pa, T = 25^{\circ}C$

Figure II.3 : Diagrammes $\dot{\gamma} = f(t)$

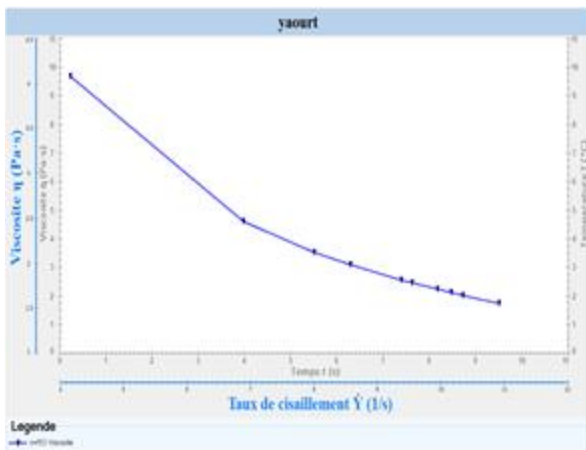
Interprétation

sous une contrainte fixe , le taux de cisaillement que subit le miel reste le même, alors que pour les autre fluides ce taux augmente avec le temps.

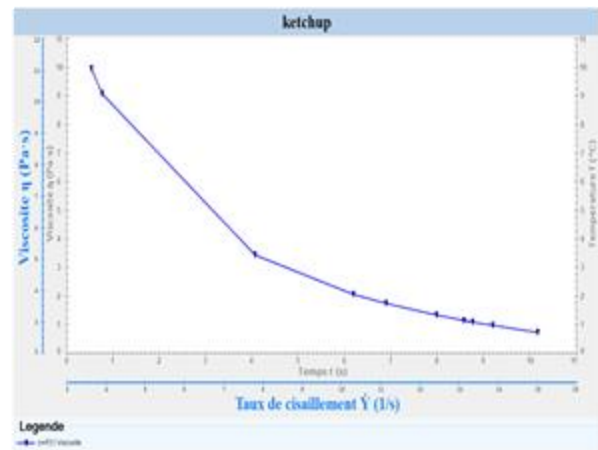
- Diagramme $\mu = f(\dot{\gamma})$



(a) : Mayonnaise, $\tau = 150 Pa$, $T = 25^\circ C$



(b) : yaourt, $\tau = 17 Pa$, $T = 25^\circ C$



(c) : ketchup, $\tau = 40 Pa$, $T = 25^\circ C$

Figure II. 4 : Diagrammes $\mu = f(\dot{\gamma})$

Interprétation

Pour les trois fluides, lorsque le taux cisaillement augmente la viscosité diminue.

Remarque.

Pour ce type de bloc (mesure à rotation constante), le diagramme $\mu = f(\tau)$ n'a pas lieu d'être.

II.1.2 bloc de mesure à rampe de rotation

Le mobile exerce une contrainte de cisaillement τ qui augmente linéairement avec le temps pendant toute la durée de l'essai. L'appareil mesure la déformation (taux de cisaillement $\dot{\gamma}$) de l'échantillon à intervalle de temps régulier. En plus des quatre courbes, le logiciel trace également la courbe d'écoulement $\tau = f(\dot{\gamma})$

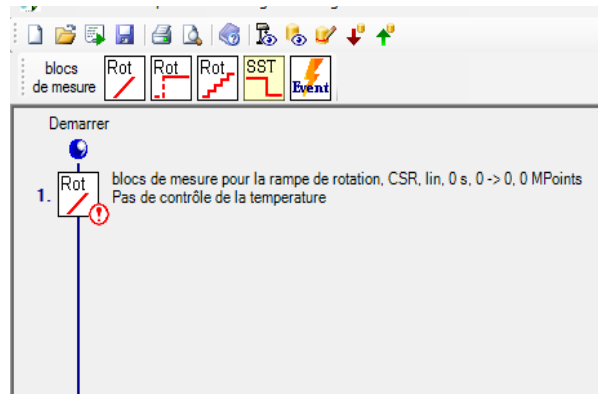


Figure II.5 : Essais avec un seul bloc (bloc de mesure à rampe de rotation)

- Diagramme $\mu = f(t)$

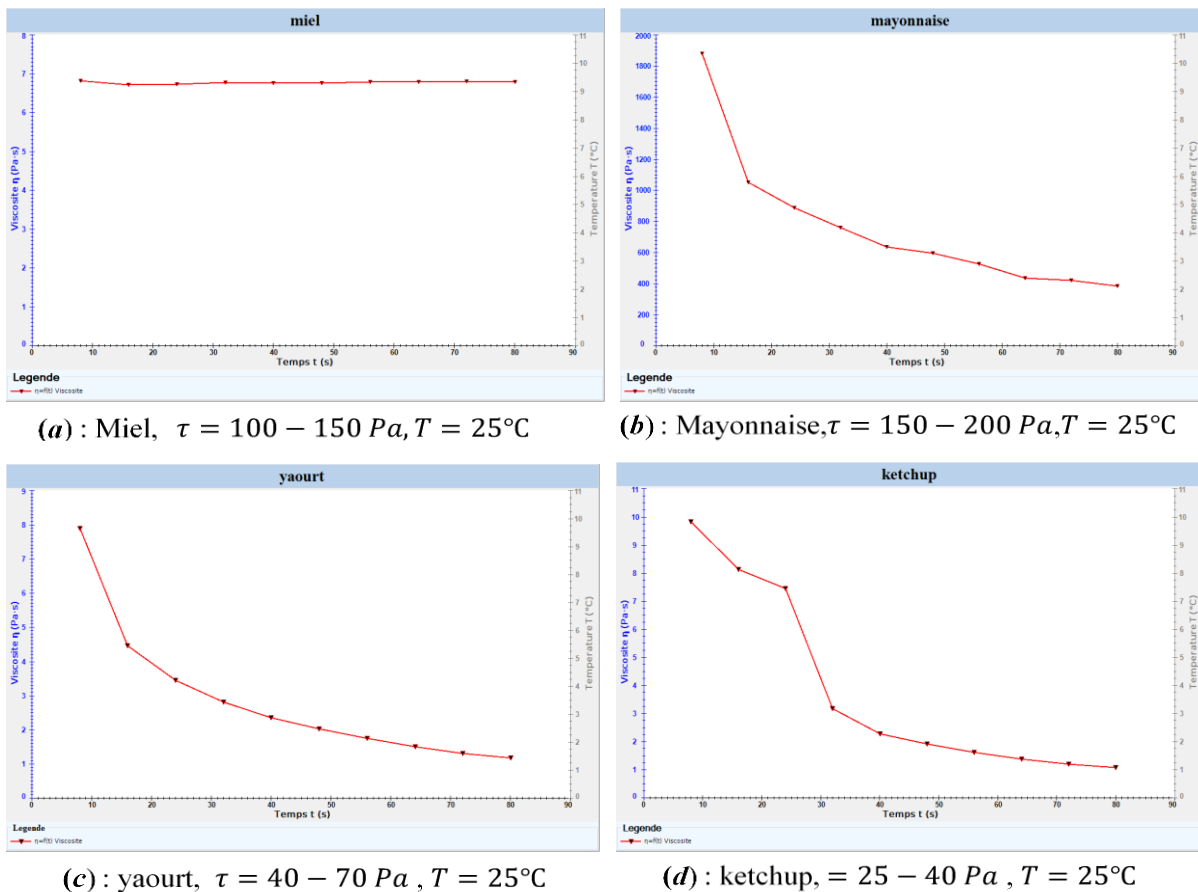
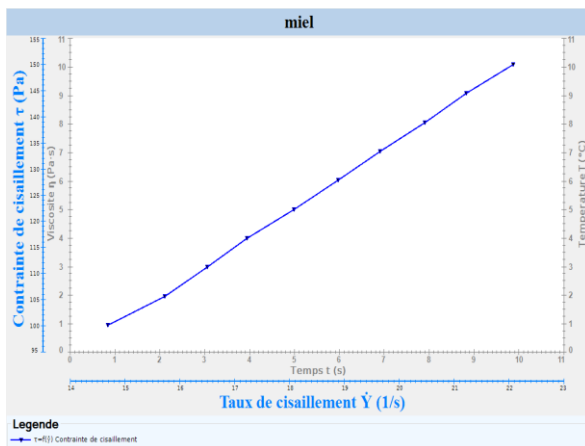


Figure II.6 : Diagrammes $\mu = f(t)$

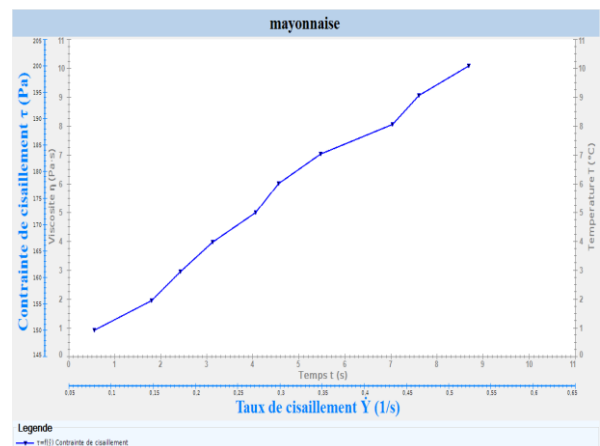
Interprétation

A contrainte variable, la viscosité du miel reste constante en fonction de temps et donc indépendante de la contrainte de cisaillement. Par contre, pour les trois autres, la viscosité est dépendante de la contrainte de cisaillement.

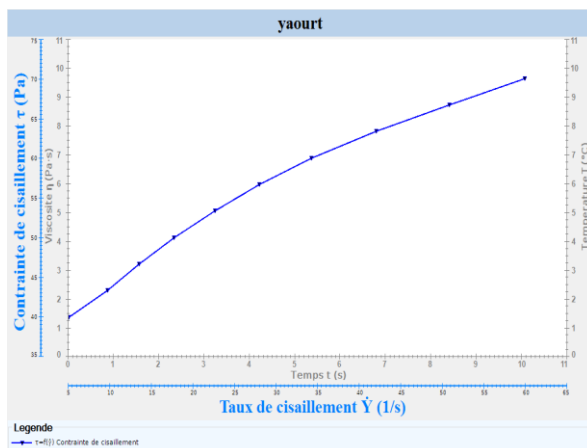
- Diagramme $\tau = f(\dot{\gamma})$



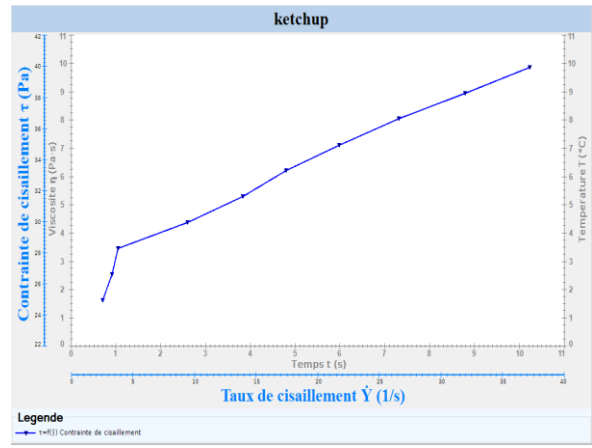
(a) : Miel, $\tau = 100 - 150 Pa, T = 25^{\circ}C$



(b) : Mayonnaise, $\tau = 150 - 200 Pa, T = 25^{\circ}C$



(c) : yaourt, $\tau = 40 - 70 Pa, T = 25^{\circ}C$



(d) : ketchup, $\tau = 25 - 40 Pa, T = 25^{\circ}C$

Figure II.7 : Diagrammes $\tau = f(\dot{\gamma})$

Interprétation

Pour l'ensemble des fluides, le taux de cisaillement augmente lorsque la contrainte augmente.

Pour le cas du miel, le taux de cisaillement augmente proportionnellement avec la contrainte.

II.2 Essais à plusieurs blocs

II.1.2 bloc à rotation en rampe plus analyse par régression plus type de visualisation de données

Dans le programme à éditer, en plus du bloc principal, on ajoute le bloc qui permet l'analyse des résultats (par régression), et éventuellement le bloc « type de visualisation » qui permet de préciser la représentation graphique désirée.

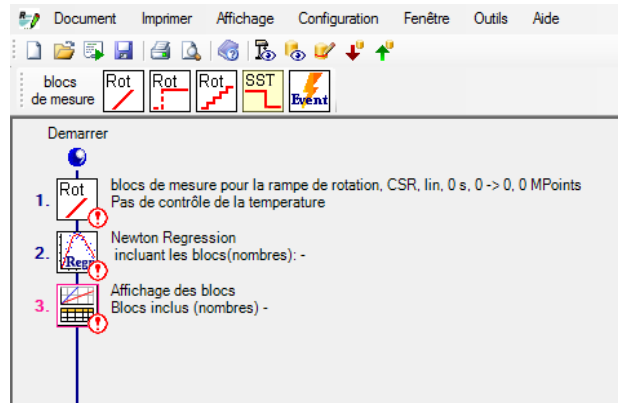


Figure II.8 : Essais à plusieurs blocs

Après exécution du programme édité, les résultats des mesures sont présentés comme indiqué ci-dessus (fig.II.9).

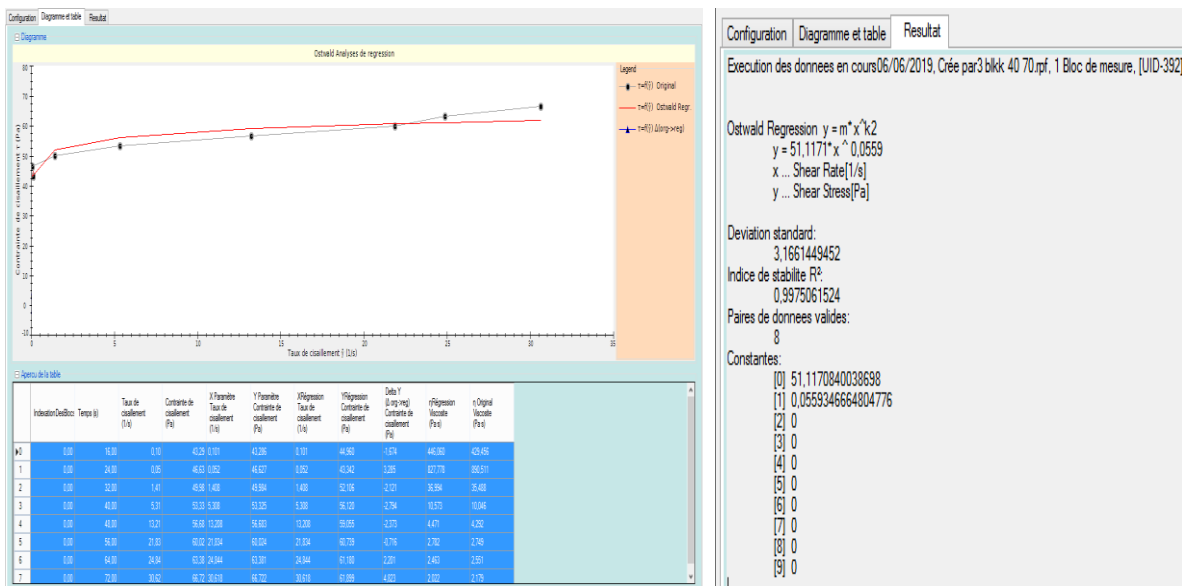


Figure II.9 : Résultat et diagramme $\tau = f(\dot{\gamma})$

- Diagramme $\tau = f(\dot{\gamma})$ – rhéogramme –

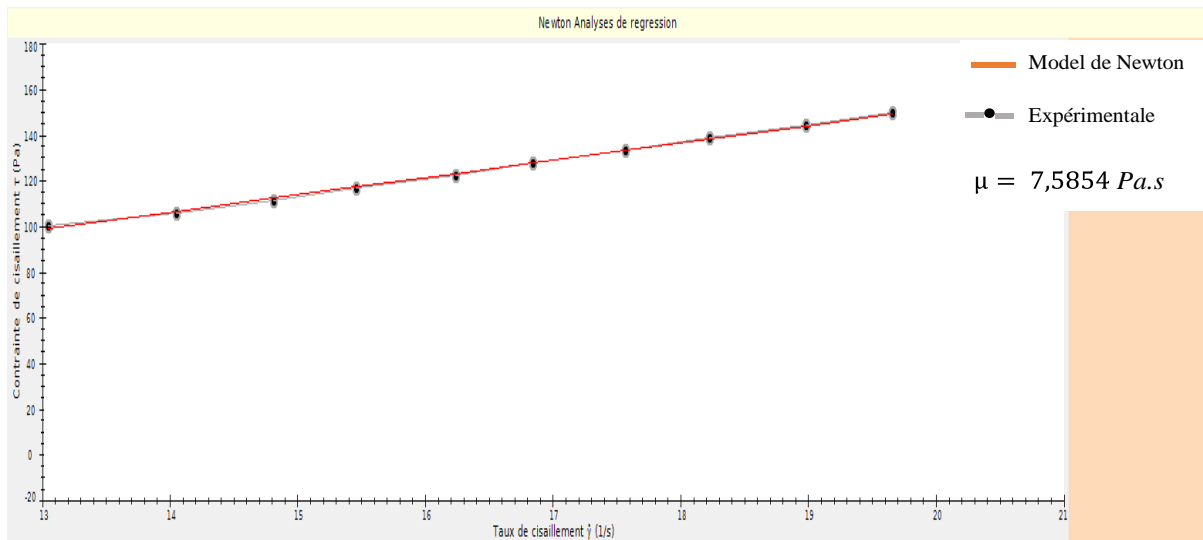


Figure II.10 : miel , $\tau = f(\dot{\gamma})$, τ : 100 – 150 Pa , $T = 25^\circ\text{C}$

Interprétation

La courbe d'écoulement obtenue dans le cas du miel est une droite, avec une ordonnée à l'origine non nulle. Cela laisse supposer qu'il s'agit d'un fluide de Bingham ($\tau - \tau_c = \mu \dot{\gamma}$). Mais on sait que le miel a un comportement newtonien ($\tau = \mu \dot{\gamma}$). Les mesures pendant les premiers instants peuvent ne pas être très fiables si le mobile choisi n'est pas le plus approprié.

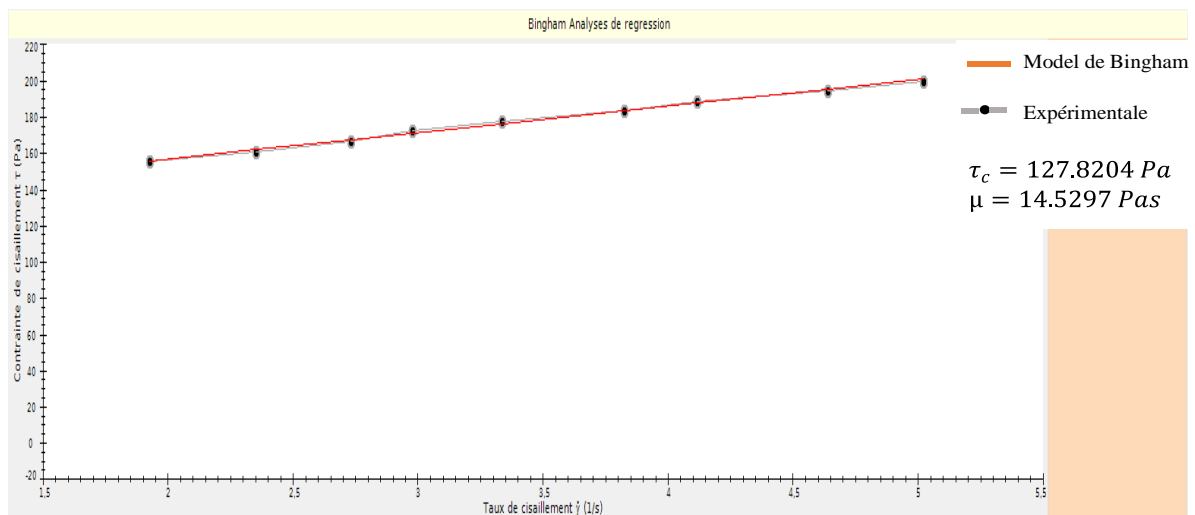


Figure II.11 : mayonnaise , $\tau = f(\dot{\gamma})$, τ : 150 – 200 Pa , $T = 25^\circ\text{C}$

Interprétation

La courbe d'écoulement obtenue pour la mayonnaise montre bien qu'il s'agit d'un fluide de type Bingham dont la loi est donnée par : $\tau - \tau_c = \mu \dot{\gamma}$. Avec τ_c la contrainte seuil ou critique qu'il faut dépasser pour qu'il ait déformation (écoulement) du fluide.

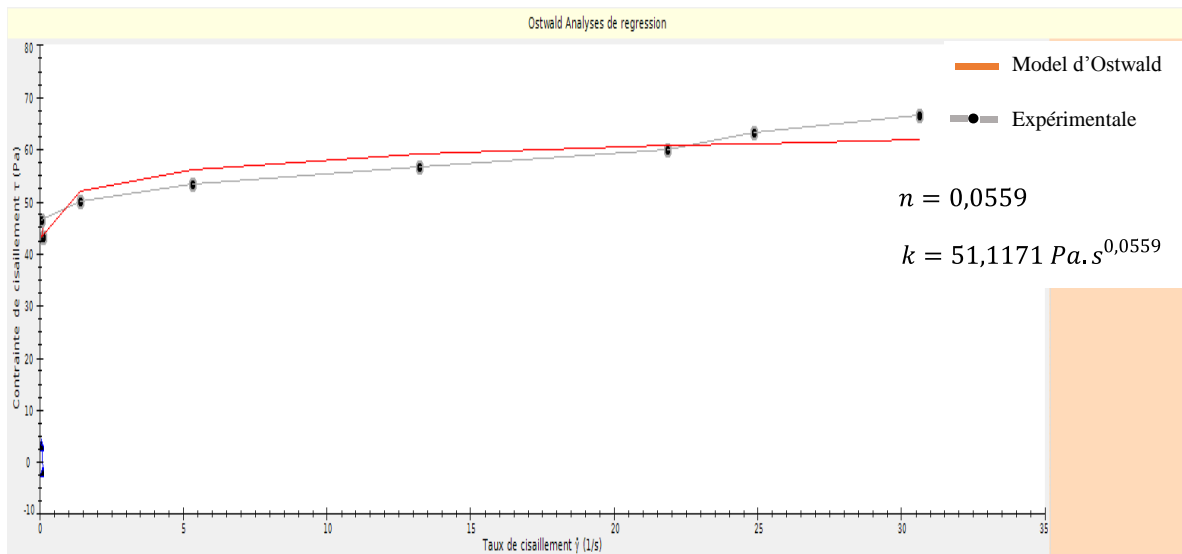


Figure II.12 : ketchup , $\tau = f(\dot{\gamma})$, $\tau: 70 - 100 Pa$, $T = 25^\circ C$

Interprétation

La courbe d'écoulement obtenue pour le ketchup suit bien la loi d'OSTWALD-DE WAELE ($\tau = k\dot{\gamma}^n$). k étant *la consistance*, et n *l'indice d'écoulement*.

Le résultat de la régression donne : $n = 0,0559$ et $k = 51,1171 Pa.s^{0,0559}$. On conclut donc que le ketchup est un *fluide rhéofluidifiant* ($n < 1$).

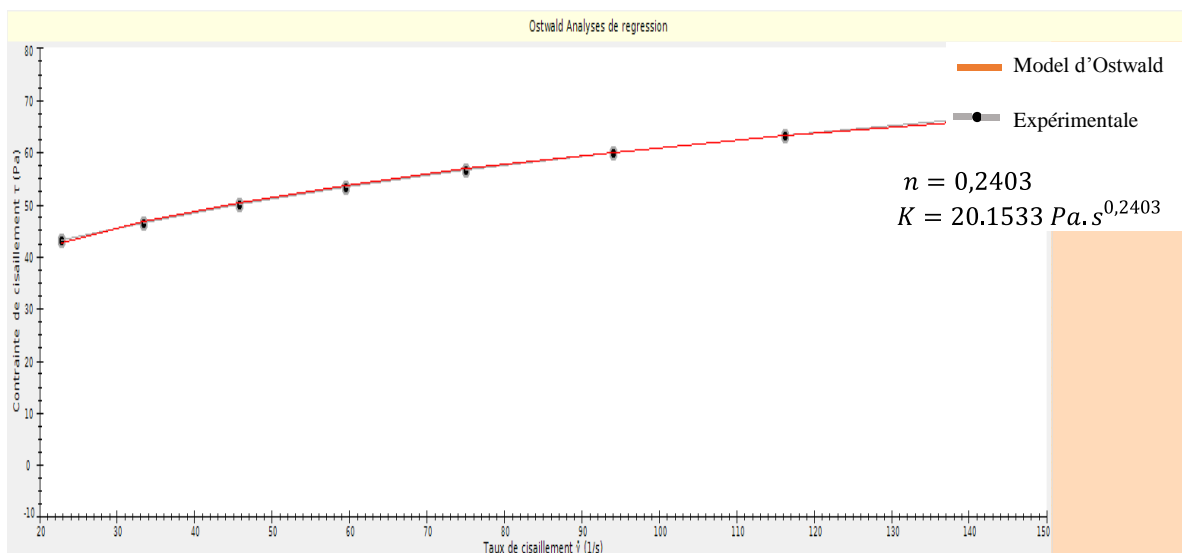


Figure II.13 : yaourt , $\tau = f(\dot{\gamma})$, $\tau: 40 - 70 Pa$, $T = 25^\circ C$

Interprétation

Le yaourt suit également la loi d'OSTWALD-DE WAELE, avec $n = 0,2403$ (rhéofluidifiant) et $K = 20.1533 Pa.s^{0,2403}$.

II .3 Etude de la viscosité en fonction de la température

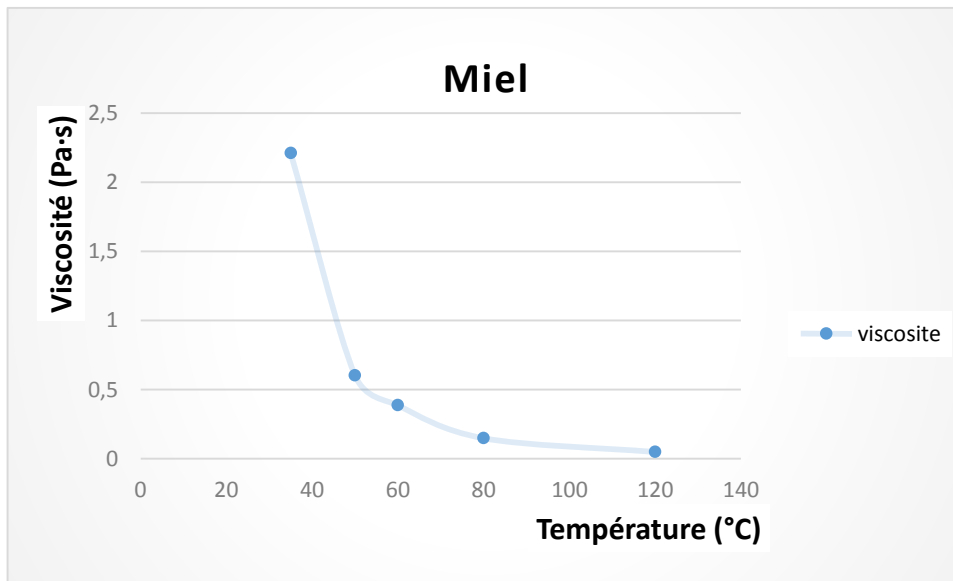


Figure II.14 : Miel , $\mu = f(T)$, $\tau: 17Pa$

Interprétation

La viscosité pour un fluide newtonien diminue avec l'augmentation de température. Le fluide devient de moins en moins visqueux lorsque sa température augmente.

Conclusion

Dans notre travail on a réussi à mettre en marche le rhéomètre. Le manuel fourni avec l'appareil nous a plus ou moins aidé dans la tâche. Nous nous sommes intéressés exclusivement au mode piloté par logiciel. De très nombreux essais ont été réalisés en étudiant différents types de fluides.

Nous avons choisi quatre fluides dont on connaît le comportement rhéologique (à partir de la littérature spécialisée). Les résultats obtenus ont bien confirmé la nature de chaque fluide.

Les essais sur le miel ont bien montré qu'il s'agit d'un fluide **Newtonien**. Sa viscosité reste constante avec le temps et indépendante du taux de cisaillement. Les mesures donnent :

$$\mu = 7,5854 \text{ Pa.s} \quad \text{à } T = 25^\circ\text{C}.$$

Les essais sur la mayonnaise ont bien montré qu'il s'agit d'un fluide non newtonien de type **Bingham** (fluide plastique) qui est connu comme étant un fluide newtonien mais avec une contrainte critique τ_c .

Les mesures donnent : $\tau_c = 127,8204 \text{ Pa}$, $\mu_p = 14,5297 \text{ Pa.s}$.

Les essais sur le ketchup ont bien montré qu'il s'agit d'un fluide non newtonien de type **rhéofluidifiant** (pseudo-plastique)

Les mesures donnent : $n = 0,0559$ et $k = 51,1171 \text{ Pa.s}^{0,0559}$.

Les essais sur Le yaourt ont bien montré qu'il s'agit d'un fluide non newtonien de type **rhéofluidifiant** (pseudo-plastique)

Les mesures donnent : $n = 0,2403$ et $K = 20.1533 \text{ Pa.s}^{0,2403}$.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Revue

[1] N. El Kissi, S. Nigen*, F. Pignon. Glissement et rhéométrie, *Rhéologie*,(2006), Vol,10, p.13-39.

- Sites Internet

- [2] Ressources nationales de chimie [en ligne].Disponible sur

< <http://eduscol.education.fr/rnchimie/phys/rheo/cours/rheo.htm> > (consulté le 10/04/ 2019)

- Ouvrage

[3] MIDOUX, N. *Mécanique et Rhéologie des fluides en génie chimique*. Paris : Tec et doc, 1985, p. 512. (ISBN : 2-8506-271-2), p.93-98.

- Sites Internet

- [4] Malvern panalytlcal. Rhéométrie[en ligne].Disponible sur

< <https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/technology/rheometry> > (consulté le 21/04/2019)

- [5] Wikipédia. Rhéomètre[en ligne].Disponible sur

< <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rh%C3%A9om%C3%A8tre> > (consulté le 26/04 2019)

- Manuel

[6] Brookfield RS-CPS+ Rhéomètre : Brookfield Engineering Laboratories, INC. Manual No. M08-218-B0212

- CD-ROM, DVD

[7] Logiciel Rheo 3000 [CD-ROM].Paris (aide manuel)

TABLE DES FIGURES

Figure I.1 : Courbe d'écoulement ou rhéogramme	08
Figure I.2 : Rhéogramme d'un fluide de Bingham	09
Figure I.3 : Rhéogramme d'un fluide plastique	10
Figure I.4 : Rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant	10
Figure I.5 : Rhéogramme d'un fluide rhéoépaississant	10
Figure I.6 : Rhéomètre à cylindres coaxiaux	12
Figure I.7 : Rhéomètre cône-plan	12
Figure I.8 : Rhéomètre plan-plan	13
Figure I.9 : Figure et schémas de principe de rhéomètre R / S plus	14
Figure I.10 : Connexions du rhéomètre	15
Figure I.11 : régulateur de température effet Peltier P-TS	15
Figure I.12 : clavier du rhéomètre et ces fonctions	16
Figure I.13 : Réglage de température	17
Figure I.14 : mobile	18
Figure I.15 : les échelles de La bague du micromètre	18
Figure I.16 : réglage au zéro de la bague du micromètre	18
Figure I.17 : l'indicateur à cadran	19
Figure I.18 : Réglage du mode	21
Figure I.19 : fenêtre principale deRheo3000	21
Figure I.20 : fenêtre l'éditeur de programme	21
Figure I.21 : fenêtre d'exécution	22
Figure I.22 : fenêtre d'affichage des résultats de mesure	22
Figure I.23 : fenêtre de terrage du bloc de test	22
Figure I.24 : fenêtre du boîte de dialogue	23
Figure I.25 : fenêtre de sélection du L'appareil et le mobile	23
Figure II.2 : Essais avec un seul bloc (mesure à rotation constante)	25
Figure II.2 : Diagrammes $\mu = f(t)$	26
Figure II.3 : Diagrammes $\gamma = \dot{f}(t)$	27
Figure II.4 : Diagrammes $\mu = f(\dot{\gamma})$	28
Figure II.5 : Essais avec un seul bloc (bloc de mesure à rampe de rotation)	29

Figure II.6 : Diagrammes $\mu = f(t)$	29
Figure II.7 : Diagrammes $\tau = f(\dot{\gamma})$	30
Figure II.8 : Essais à plusieurs blocs	31
Figure II.9 : Résultat et diagramme $\tau = f(\dot{\gamma})$	31
Figure II.10 : miel, $\tau = f(\dot{\gamma})$, τ : 100 – 150 Pa, $T = 25^\circ\text{C}$	32
Figure II.11 : mayonnaise, $\tau = f(\dot{\gamma})$, τ : 150 – 200 Pa, $T = 25^\circ\text{C}$	32
Figure II.12 : ketchup, $\tau = f(\dot{\gamma})$, τ : 40 – 70 Pa, $T = 25^\circ\text{C}$	33
Figure II.13 : yaourt, $\tau = f(\dot{\gamma})$, τ : 40 – 70 Pa, $T = 25^\circ\text{C}$	33
Figure II.14 : Miel, $\mu = f(T)$, τ : 17Pa, $T = 25^\circ\text{C}$	34

A.1 Le dispositif de contrôle de température à effet Peltier

Le capteur de température à effet Peltier Pt100 permet une régulation de température de 0 ° C à + 135 ° C (modèle P1) ou de + 20 ° C à + 180 ° C (modèle P2). Une alimentation à découpage (15V / 60W) dans l'unité à effet Peltier P-TS alimente l'amplificateur Peltier. Un voyant vert indique que l'appareil est sous tension, tandis qu'un voyant rouge indique un défaut.

Après l'activation de l'interrupteur principal, le voyant vert s'allume sur le P-TS. L'affichage du rhéomètre indique que la fonction de contrôle dans le répertoire du menu est "Thermostat".

Le P-TS doit être éteint pendant le fonctionnement non supervisé (chauffage ou refroidissement). Si le R / S plus a été équipé d'un système de contrôle de la température à effet Peltier (modèle R / S CPS + P1 ou R / S CPS + P2), aucun bain / circulateur n'est utilisé.

A.2 Systèmes de mesure

Le rhéomètre R / S plus est censé être fourni avec un jeu de 9 mobiles (en option).

Les types de systèmes de mesure sont :

- a) systèmes de mesure cône / plan
- b) systèmes de mesure plan / plan
 - Fiches techniques des systèmes de mesure standard

Tableau a : Systèmes de mesure de cônes / plaques selon DIN 53018

(composé du cône de mesure et le plateau immobile de l'instrument)

Système mesure	RC3-25-1	RC3-25-2	RC3-50-1	RC3-50-2	RC3-75-1	RC3-75-2
Plage vitesse de cisaillement [1/s]	0 - 6.000	0-3.000	0-6.000	0-3.000	0-6.000	0-3.000
Plage de contrainte de cisaillement [pa]	0-12.223	0-12.223	0-1.528	0-1.528	0-452	0-452
Plage de viscosité [pa.s]	0.25-1.629	0.5-3.259	0.03-203	0.06-407	0.009-60	0.02-120
Volume de remplissage [ml]	0.08	0.3	0.7	1.5	2.0	3.9
Facteur de cisaillement $k\gamma$ [min/s]	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00
Facteur de contrainte au cisaillement $t\%$ [Pa]	12.223	12.223	1.528	1.528	0.4527	0.4527
Rayon du cône de mesure R[mm]	12.5	12.5	25	25	37.5	37.5
Angle du cône de mesure α [°]	1	2	1	2	1	2
Troncature du cône [μm]	50	50	50	50	50	50

Tableau b : Systèmes de mesure plan / plan selon DIN 53-018
(comprenant la plaque de mesure et le plateau immobile de l'instrument)

Système de mesure	RP3-25	RPS-50	RP3-75
Plage vitesse de cisaillement [1/s]	0-1.308	0-2.600	0-3.925
Plage de contrainte de cisaillement [Pa]	0-16.298	0-2.037	0-603
Plage de viscosité [pas]	1.56-9.960	0.097-623	0.02-122
Volume de remplissage [ml]	0.5	2.0	4.5
Facteur de cisaillement $\kappa\gamma$ [min/s]	1.309	2.6175	3.927
Facteur de contrainte au cisaillement $t\%$ [Pa]	16.2975	2.037	0.6036
Rayon du cône de mesure R[mm]	12.5	25	37.5

A.3 Résultats numériques des mesures

- **bloc de mesure à rotation constante**

Tableau 1 : Viscosité en fonction de temps

	$\tau = 25$ (Pa)	$\tau = 40$ (Pa)	$\tau = 17$ (Pa)	$\tau = 150$ (Pa)
Temps (s)	Viscosité (Pa·s) (Miel)	Viscosité (Pa·s) (ketchup)	Viscosité (Pa·s) (yaourt)	Viscosité (Pa·s) (mayonnaise)
8	5,1919	11,0519	4,0705	90,8352
16	5,3135	10,2532	2,4603	84,9097
24	5,1976	5,1240	2,1157	81,8750
32	5,3344	3,8749	1,9768	78,3469
40	5,2018	3,5844	1,8069	79,7654
48	5,2549	3,2126	1,7757	79,1591
56	5,2289	2,9914	1,7037	79,7099
64	5,2738	3,0427	1,6680	75,6560
72	5,2448	2,8798	1,6374	74,3787
80	5,2032	2,6599	1,5520	75,6560

Tableau 2 : Taux de cisaillement en fonction du temps

	$\tau = 25(\text{Pa})$	$\tau = 40 (\text{Pa})$	$\tau =17 (\text{Pa})$	$\tau =150 (\text{Pa})$
Temps (s)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (1/s) (Miel)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (1/s) (ketchup)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (1/s) (yaourt)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (1/s) (mayonnaise)
8	4,803	3,613	4,164	1,651
16	4,693	3,894	6,889	1,766
24	4,797	7,792	8,011	1,831
32	4,674	10,304	8,574	1,914
40	4,794	11,140	9,380	1,880
48	4,745	12,429	9,545	1,894
56	4,769	13,348	9,948	1,881
64	4,728	13,123	10,162	1,982
72	4,754	13,865	10,352	2,016
80	4,792	15,012	10,921	1,982

Tableau 3 : Viscosité en fonction du Taux de cisaillement

Miel		ketchup		yaourt		mayonnaise	
Viscosité (Pa·s)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$)(1/s)	Viscosité (Pa·s)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (1/s)	Viscosité (Pa·s)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$)(1/s)	Viscosité (Pa·s)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$)(1/s)
5,1919	14,683	11,0519	2,539	4,0705	5,065	90,8352	0,080
5,3135	15,724	10,2532	3,271	2,4603	9,725	84,9097	0,148
5,1976	16,504	5,1240	3,793	2,1157	13,553	81,8750	0,182
5,3344	17,226	3,8749	9,426	1,9768	17,755	78,3469	0,220
5,2018	18,079	3,5844	13,903	1,8069	22,685	79,7654	0,271
5,2549	18,886	3,2126	17,424	1,7757	27,993	79,1591	0,298
5,2289	19,647	2,9914	21,722	1,7037	34,251	79,7099	0,348
5,2738	20,464	3,0427	26,566	1,6680	42,048	75,6560	0,433
5,2448	21,219	2,8798	31,941	1,6374	50,874	74,3787	0,465
5,2032	22,075	2,6599	37,216	1,5520	59,916	75,6560	0,524

- **bloc de mesure à rampe de rotation**

Tableau 1 : Viscosité en fonction du temps

	$\tau = 100-150$ (Pa)	$\tau = 150-200$ (Pa)	$\tau = 40-70$ (Pa)	$\tau = 25-40$ (Pa)
Temps (s)	Viscosité (Pa·s) (Miel)	Viscosité (Pa·s) (ketchup)	Viscosité (Pa·s) (yaourt)	Viscosité (Pa·s) (mayonnaise)
8	6,8151	9,8191	7,8840	1877,7568
16	6,7165	8,1308	4,4512	1051,2277
24	6,7347	7,4496	3,4403	885,1388
32	6,7739	3,1761	2,8152	757,6182
40	6,7611	2,2730	2,3507	635,3886
48	6,7654	1,9090	2,0249	595,4868
56	6,7855	1,6079	1,7525	526,4249
64	6,7854	1,3779	1,5074	435,8749
72	6,8051	1,1980	1,3115	418,3666
80	6,7922	1,0729	1,1696	381,9143

Tableau 2 : Taux de cisaillement et contrainte de cisaillement

Miel		ketchup		yaourt		mayonnaise	
Contrainte de cisaillement (τ) (Pa)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$)(1/s)	Contrainte de cisaillement (τ) (Pa)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (1/s)	Contrainte de cisaillement (τ) (Pa)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$)(1/s)	Contrainte de cisaillement (τ) (Pa)	Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$)(1/s)
100,067	14,683	24,935	2,539	39,929	5,065	149,937	0,080
105,608	15,724	26,598	3,271	43,286	9,725	155,494	0,148
111,149	16,504	28,260	3,793	46,627	13,553	161,052	0,182
116,690	17,226	29,939	9,426	49,984	17,755	166,609	0,220
122,231	18,079	31,601	13,903	53,325	22,685	172,167	0,271
127,772	18,886	33,263	17,424	56,683	27,993	177,724	0,298
133,314	19,647	34,926	21,722	60,024	34,251	183,298	0,348
138,855	20,464	36,604	26,566	63,381	42,048	188,855	0,433
144,396	21,219	38,267	31,941	66,722	50,874	194,413	0,465
149,937	22,075	39,929	37,216	70,079	59,916	199,970	0,524

- **Viscosité en fonction de température**

Tableau 1 : Miel

Température (°C)	35	50	60	80	120
Viscosité (Pa·s)	2.2107	0.6030	0.3866	0.1482	0.0488