



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Construction Mécanique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Ahmed AHMED MERDOUKH**

Le : mardi 28 juin 2022

## **Conception et réalisation des accessoires pour la caractérisation rhéologique des produits agroalimentaires**

---

### **Jury :**

Mr	Hecini MABROUK	Pr	Université de Biskra	Président
Mr	Adel BENCHABANE	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr	Tahar MASRI	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021 - 2022

*A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout  
au long de mes études,  
A mes frères et soeurs.....pour leurs encouragements constants et leur soutien moral,  
A mes amis..... pour leurs encouragements et leur soutien,  
A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,  
Merci d'être toujours à mes côtés*

# *Remerciement*

En tout premier lieu, je dois remercier le bon Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la santé pour dépasser toutes les difficultés et réaliser ce projet.

Ce mémoire de Master est réalisé dans le cadre du projet de recherche universitaire PRFU-A11N01UN070120220002. Je tiens tout d'abord à remercier mon encadrant **Pr. Adel BENCHABANE**, de m'avoir confié ce travail et m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet. Je suis très reconnaissant non seulement pour sa confiance en moi mais aussi pour sa patience et sa motivation. Son encadrement et sa disponibilité m'ont permis d'explorer de nouveaux domaines de la science et d'acquérir beaucoup d'autonomie.

Mes vifs remerciements au **Pr. Hecini MABROUK** qui m'a fait l'honneur de bien vouloir présider le jury et au **Dr. Tahar MASRI** pour bien vouloir examiner notre travail ; ainsi que tous les enseignants du département de génie mécanique.

Je remercie également le responsable du Hall technologique Monsieur **Smail GUETTALA**, son personnel technique et **Dr. Lamine Baci** pour l'aide et l'encouragements pour bien mener ce travail, notamment durant la phase expérimentale de l'étude.

Je tiens à remercier le **Dr Mohamed-Chaouki NEBBAR**, responsable du Plateau Technique d'Analyses Physicochimiques PTAPC - CRAPC - Biskra, ainsi que les ingénieurs : **Dr Samir HAMEURLAINE**, **Dr Karima LAMAMRA**, **Mr Boualem DJRIDI** pour leur aide précieuse durant les phases de mesures, essais et tests rhéologiques.

J'adresse mes remerciements aussi à Mlle **Aida GHAZALI** pour les discussions, ses idées, sa disponibilité et son aide notamment durant les phases des corrections du brevet et de ce mémoire.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde et sincère gratitude envers ma mère, ma famille pour m'avoir encouragé et soutenu tout au long de mes études.

Afin de n'oublier personne, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce mémoire.

## Résumé

Le but de ce travail est de se familiariser avec les méthodes de caractérisation rhéologique des matériaux agroalimentaires viscoélastiques en étudiant : i) la possibilité de concevoir, réaliser et valider localement des géométries de mesures pour le rhéomètre à contrainte imposée; et ii) de contribuer à la proposition d'un accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs simplifiant le nettoyage du plan pour chaque manipulation et permettant le contrôle des problèmes de glissement et d'évaporation de l'eau durant la mesure. En plus de la partie bibliographique, le mémoire présente les détails de la conception et de l'usinage des géométries de mesure, pour rhéomètre à contrainte imposée, réalisées localement. Des tests rhéologiques de validation expérimentale ont été effectués sur la confiture d'abricot (Amor Ben Amor) et une graisse industrielle. Pour cela, on a utilisé des outils originaux et d'autres fabriqués au niveau de l'université en Aluminium et en Acier. Les résultats obtenus sont satisfaisants ce qui montrent que l'étude ouvre des perspectives pour la rhéologie, ainsi que la fabrication d'accessoires et d'instruments de mesure dans divers domaines. D'autre part, on a pu contribuer à la rédaction et à l'enregistrement d'un brevet d'invention (DZ Patent, N° 220446, déposé le 3 juillet 2022) en collaborant avec des membres du projet PRFU- A11N01UN070120220002.

**Mots clés :** Rhéomètre, outil de mesure, géométrie plan, accessoire, confiture d'abricot, graisse industrielle

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو التعرف على طرق التوصيف الريولوجي للمواد الغذائية الزراعية اللزجة المرنة من خلال دراسة: (1) إمكانية التصميم والتصنيع والتحقق محلياً للأجزاء قياس خاصة بالريومتر؛ و(2) المساهمة في اقتراح ملحقات متعددة الوظائف ثلاثي الوظائف خاصة بريومتر لتبسيط تنظيف مساحة القياس والسماح بالتحكم في مشاكل الانزلاق وتبخر العينات أثناء القياس. بالإضافة إلى الجزء البليوغرافي، تعرض الرسالة تفاصيل تصميم وتصنيع أجزاء القياس الريومتر المنتجة محلياً. أجريت الاختبارات الريولوجية للتحقق التجريبي على مربى المشمش (عمر بن عمر) وشحم صناعي. لهذا الغرض، استخدمنا أدوات أصلية وأخرى مصنوعة على المستوى الجامعي من الألمنيوم وحديد الصلب. كانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية، ما يسمح بفتح آفاقاً جديدة لتطوير علم الريولوجيا، وكذلك تصنيع الملحقات وأدوات القياس في مختلف المجالات. من ناحية أخرى، تمكنا من المساهمة في صياغة وتسجيل براءة اختراع من خلال التعاون مع أعضاء مشروع بحث الجامعي PRFU-

A11N01UN070120220002.

**الكلمات المفتاحية:** جهاز ريومتر، أداة قياس، هندسة مستوية، ملحقات، مربى مشمش، شحم صناعي



# Sommaire

Remerciement .....	II
Résumé .....	III
ملخص.....	III
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures .....	viii
Nomenclature .....	ix
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur la rhéologie .....</b>	<b>2</b>
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur la rhéologie .....	3
I.3. Applications de la rhéologie .....	4
I.4. La description du comportement rhéologique .....	4
I.4.1. Contrainte de cisaillement.....	5
I.4.1.2 Cisaillement plan .....	5
I.4.2 Taux de cisaillement .....	7
I.4.3 Viscosité.....	7
I.4.3.1 Définition .....	7
I.4.3.2 Viscosité de cisaillement.....	7
I.5 Classification du comportement des fluides .....	9
I.5.1 - Fluide Newtonien .....	9
I.5.2 - Fluide non-Newtonien .....	10
I.5.2.1 Fluides indépendants du temps .....	10
<b>I.5.2.1.1 Fluides rhéofluidifiants ou pseudoplastiques à seuil.....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.2.1.2 Fluides viscoplastiques .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.2.1.3 Fluides rhéoépaississant ou dilatant.....</b>	<b>12</b>
I.5.2.2 Fluides dépendant du temps.....	13
<b>I.5.2.2.1 Les fluides thixotropes.....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2.2.2 Les fluides antithixotropes .....</b>	<b>14</b>
I.6 Modèles rhéologiques .....	15
I.7 Technique de mesure rhéologique .....	17
I.7.1 Essais de rotation .....	17
I.7.1.1 Essais à taux de cisaillement imposé .....	17
I.7.1.2 Essais contrainte de cisaillement imposé.....	18
I.8 Glissement aux parois .....	18
I.9 Problème d'évaporation.....	20
I.10 Conclusion .....	21

**Chapitre II : Généralités sur la rhéométrie rotative ..... 22**

II.1 Introduction ..... 23

II.2 Historique ..... 23

II.3 Rhéomètre..... 23

II.4 Ensemble de mesure du rhéométrie rotative..... 24

    II.4.1 Général ..... 24

    II.4.2 Systèmes de contrôle de la température..... 25

II.5 Types de rhéomètre rotatifs ..... 26

    II.5.1 Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux..... 26

        II.5.1.1 Définition..... 26

        II.5.1.2 Avantages et inconvénients de Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux ..... 27

**II.5.1.2.1 Avantages ..... 27**

**II.5.1.2.1 Inconvénients ..... 28**

    II.5.2 Les rhéomètres rotatifs cône-plan..... 28

        II.5.2.1 Définition..... 28

        II.5.2.2 Méthode de calcul..... 29

        II.5.2.3 Quand utiliser le rhéométrie rotative cône-plan ..... 30

        II.5.2.4 Avantages et inconvénients de Rhéométrie rotative cône-plan ..... 30

**II.5.2.4.1 Avantages ..... 30**

**II.5.2.4.1 Inconvénients ..... 30**

    II.5.3 Les rhéomètres rotatifs plan-plan ..... 31

        II.5.3.1 Définition..... 31

        II.5.3.2 Méthode de calcul..... 31

        II.5.3.3 Quand utiliser le rhéométrie rotative plan-plan ..... 32

        II.5.3.4 Avantages et inconvénients de rhéométrie rotative plan-plan ..... 32

**II.5.3.4.1 Avantages ..... 32**

**II.5.3.4.2 Inconvénients ..... 32**

    II.6 Rhéomètre hybride Discovery (HR 20)..... 33

    II.7 Les spécifications du Rhéomètre hybride Discovery (DHR) HR20..... 33

    II.8 Conclusion..... 35

**Chapitre III : Proposition d'un nouvel accessoire multifonction pour rhéomètres ..... 36**

III.1 Résumé de l'idée ..... 37

III.2 Domaine technique auquel se rapporte l'invention..... 37

III.3 Etat de la technique antérieure ..... 39

III.4 But de l'invention..... 40

III.5 Présentation de l'essence de l'invention et son mode de réalisation..... 41

III.6 Revendications ..... 42

**Chapitre IV : Conception et réalisation de géométries de**

**mesure pour rhéomètre à contrainte imposée .....45**

IV.1 Introduction..... 46

IV.2 Prendre les mesures de la pièce..... 46

..... 46

IV.3. Réalisation..... 47

IV.3.1. Partie Conception..... 47

IV.3.1.1. Définition de la CAO ..... 47

IV.3.1.2. Définition du SOLIDWORKS ..... 47

IV.3.1.3 Dessin technique de la pièce par logiciel SOLIDWORKS ..... 47

IV.3.1.4 Gamme d'usinage de la géométrie de mesure plan-plan ..... 49

IV.3.2. Partie Fabrication ..... 52

IV.3.2.1. Les machines utiliser pour fabrication ..... 52

IV.3.2.1.1. Scie alternative ..... 52

IV.3.2.1.2. Toure ..... 52

IV.3.2.2. Les photos des pièces à fabriquer..... 53

IV.6 Conclusion ..... 54

**Chapitre V : Tests expérimentaux et validation des pièces fabriquées ..... 55**

V.1 Introduction ..... 56

V.2 Description et Installation de Le rhéomètre hybride Discovery ..... 57

V.2.1. Les compose de Le rhéomètre hybride Discovery (HR 20) ..... 57

V.2.1.1. Les compose d'espace travail..... 57

V.2.1.2Appareil de circulateur ..... 57

V.2.1.3 Fonctionnement du clavier ..... 58

V.2.2. Procédure de mise en marche..... 58

V.2.2.1. Préparation du Rhéomètre avant démarrage de l'utilisation ..... 59

V.2.2.2. Démarrage du Rhéomètre..... 59

V.2.3. Mise en place de l'échantillon..... 59

V.3. Protocole de mesure ..... 61

V.4. Tests expérimentaux de la géométrie de mesure plan-plan fabrique..... 63

V.4.1. La géométrie de mesure plan-plan en utilisant..... 63

V.4.2. Validation..... 64

Pour validation on a fait troie validation..... 64

V.4.2.1 Définition du moment d'inertie..... 64

V.4.2.3 Première validation..... 64

V.4.2.3 Deuxième validation..... 65

V.4.2.3.1 Comparaison des résultats des tests..... 65

V.4.2.4 Troisième validation..... 67

V.4.2.4.1 Comparaison des résultats des tests..... 67

IV.5. Résultats et discussions.....	69
V.6.Conclusion.....	70
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>71</b>
<b>Références.....</b>	<b>72</b>
<b>Annexe : Dessin technique des pièces usinées.....</b>	<b>74</b>

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Données brutes et paramètres rhéologiques des essais de rotation à taux de cisaillement imposée [24].....	18
Tableau I.2 : Données brutes et paramètres rhéologiques des essais de rotation avec contrainte de cisaillement imposée [24].....	18
Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux [32]. ..	27
Tableau II.2 : Quand utiliser le rhéométrie rotative cône-plan [34].....	30
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de Rhéométrie rotative cône-plan [27] [33].....	30
Tableau II.4 : Quand utiliser le rhéométrie rotative plan-plan [34]. ..	32
Tableau II.5 : Avantages et inconvénients de rhéométrie rotative plan-plan [27] [33].....	32
Tableau II.6 : Les spécifications Rhéomètre hybride Discovery (DHR) HR20 [38]. ..	34
Tableau V.1: les boutons du clavier.....	58
Tableau V.2 : Les géométries de mesure utilisées .....	63
Tableau V.3 : Moment d'inertie des géométries de mesure utilisées .....	64

## Liste des figures

Figure I.1 : Mouvement laminaire de cisaillement plan [6].....	5
Figure I.2 : Ecoulement laminaire qui peut se produire dans une fente de cisaillement : (1) état au repos ; (2) écoulement laminaire homogène, montrant un taux de cisaillement [8]. ..	6
Figure I.3 : Classification des fluides en fonction de leur comportement d'écoulement.....	9
Figure I.4 : Courbe d'écoulement ou rhéogramme [11].....	10
Figure I.5 : Types des comportements non-Newtoniens indépendant du temps.....	11
Figure I.6 : Représentation schématique du comportement dilatant [13]. ..	13
Figure I.7 : Représentation schématique de la courbe $\tau = f(\dot{\gamma})$ . Pour le comportement dépendant du temps [13].....	13
Figure I.8 : Lois de comportement élémentaires [6]. ..	15
Figure I.9 : Mise en évidence du glissement d'un fluide à seuil. Rhéométrie rotative à vitesse imposée en géométrie cône-plan [27]. ..	19
Figure I.10 : Techniques de diminution de l'évaporation .....	20
Figure II.1: Exemple d'ensemble de mesure [32].....	25
Figure II.2 : Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux [32]. ..	27
Figure II.3 : Caractéristiques de la géométrie cône-plan.....	29
Figure II.4 : Caractéristiques de la géométrie plan-plan. ....	31
Figure II.5 : Rhéomètre hybride Discovery (HR 20) TA Instruments [38].....	33
Figure III.1 : Accessoires multifonctionnels d'un rhéométrie rotative. La figure résume comment l'utilisation des accessoires sur un rhéométrie rotative (plaque Peltier) les uns sur les autres dans l'arrangement conformément à la présente invention.....	38
Figure III.2 : La figure 2 est un accessoire multifonctionnel pour un rhéométrie rotative. La figure résume comment installer tous les accessoires multifonctionnels et un échantillon après qu'il a été préparé avec un instrument de mesure et sur un rhéomètre (plaque). ..	39
Figure IV.1: Pied à coulisse .....	46
Figure IV.2 : Géométrie de mesure plan plan de diamètre Ø40 mm de TA instruments.....	46
Figure IV.3 : Dessin de technique géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm .....	48
Figure IV.4 : Scie alternative .....	52
Figure IV.5 : Le toure.....	52
Figure IV.6 : Géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm en acier.....	53
Figure IV.7 : l'axe de fixation avec tété.....	53
Figure IV.8 : Géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm en aluminium .....	53
Figure V.1 : Les compose d'espace travail de Le rhéomètre hybride Discovery (HR 20) .....	57
Figure V.2 : Appareil de circulateur.....	57
Figure V.3 : les boutons du clavier .....	58
Figure V.4 : confiture d'abricot Amor Benamor.....	59
Figure V.5 : Étape 1 .....	60

Figure V.6 : Étape 2 ..... 60  
 Figure V.7 : Étape 3 ..... 61  
 Figure V.8 : le protocole de mesure pour les Phases premier et deuxième mis en place (plateau - plateau)  $\gamma$  imposée ..... 62  
 Figure V.9 : le protocole de mesure pour la troisième phase mis en place ..... 62  
 Figure IV.10 : différence entre le moment d'inertie par le Rhéomètre et SOLIDWORKS..... 65  
 Figure V.10 : courbe d'écoulement du premier et la deuxième testée en utilisant confiture d'abricot. .... 66  
 Figure V.11 : courbe d'écoulement de quatre testés..... 66  
 Figure V.12 : les courbes de de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement de quatre testés..... 67  
 Figure V.13 : une graisse industrielle [42]. ..... 67  
 Figure V.14 : Courbe d'écoulement du premier et la deuxième testée en utilisant graisse industrielle..... 68  
 Figure V.15 : les courbes de de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement graisse industrielle de deux testés. .... 68  
 Figure IV.9 : Surfaces ne peuvent pas être modifiés..... 69

## Nomenclature

### NOTATIONS GRECQUES DIMENSIONNELLES

DESIGNATION	Unité	Description
$\mu$	<i>Pa.s</i>	Viscosité dynamique newtonienne
$\dot{\gamma}$	<i>s-1</i>	Vitesse (taux) de cisaillement
$\tau$	<i>Pa</i>	Contrainte de cisaillement
$\tau_c$	<i>Pa</i>	Contrainte critique lorsque la vitesse de cisaillement tend vers 0
$\delta$	<i>rad</i>	l'angle de rotation
$\omega$	<i>s-1 ou rad/s</i>	vitesse de rotation (angulaire)

### NOTATIONS LATINES DIMENSIONNELLES

DESIGNATION	Unité	Description
<i>k</i>	<i>Pa.sn</i>	Consistance d'un fluide d'OSTWALD,
<i>Rp</i>	<i>m</i>	Rayon de plan,
<i>Rc</i>	<i>m</i>	Rayon de cône,
HCP	<i>m</i>	Distance entre la pointe du cône et la plaqu,
HPP	<i>m</i>	Distance entre ces deux plans,
<i>S</i>	<i>m2</i>	La surface,
<i>F</i>	<i>N</i>	La force,
<i>T</i>	°C	Température,
<i>t</i>	<i>s</i>	Temps,

### EXPOSANTS

<b><i>n</i></b>	Indice d'écoulement des fluides
-----------------	---------------------------------

## **Introduction générale**

Les mesures relatives à la rhéologie d'un fluide sont effectuées par un rhéomètre qui est un appareil de laboratoire généralement de faible dimension caractéristique. Il permet d'étudier fondamentalement les propriétés viscoélastiques et d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une émulsion, d'une pâte, en réponse à une force appliquée. Dans ce type de mesures on rencontre le problème de nettoyage de la géométrie de mesures après chaque manipulation. On rencontre également les problèmes de glissement avec les parois solides et de l'évaporation de l'échantillon généralement contact direct avec l'atmosphère. C'est trois problèmes seront traités dans le cadre de ce mémoire de Master qui a comme objectifs de : i) Se familiariser avec des méthodes de caractérisation rhéologique des matériaux agroalimentaires viscoélastiques ; ii) Tester la possibilité de concevoir, réaliser et valider localement des géométries de mesures pour le rhéomètre HR20 ; iii) Proposer un nouvel accessoire pour les rhéomètres ; et iv) Rédiger et enregistrer un brevet d'invention en collaborant avec des membres du projet PRFU- A11N01UN070120220002.

Le mémoire est structuré dans cinq chapitres comme suit : D'abord on découvre le domaine de rhéologie et la rhéométrie rotative dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> chapitre. Le troisième chapitre présente une idée innovante d'un nouvel accessoire multifonction pour rhéomètres préparé sous forme de brevet. L'idée, développée dans le cadre du projet cité plus haut, est enregistré sous forme de brevet d'invention (DZ Patent, N° 220446, déposé le 3 juillet 2022). La partie expérimentale de l'étude est présentée dans le 4<sup>ème</sup> et le 5<sup>ème</sup> chapitre qui sont consacrés à la conception, l'usinage et la validation expérimentale de géométries de mesure pour rhéomètre à contrainte imposée. L'Annexe est réservée à la gamme d'usinage des pièces fabriquée.

# **Chapitre I : Généralités sur la rhéologie**



## I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous commençons par quelques concepts utiles sur la rhéologie, les types de fluides en rhéologie et comment leur viscosité change lorsque des forces externes leur sont appliquées, et des équations mathématiques qui relient la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement, pour décrire les comportements rhéologiques les plus courants, et introduisons les techniques habituelles de mesures rhéologiques, et Problèmes qui surviennent pendant la mesure.

## I.2. Généralités sur la rhéologie

Le terme "rhéologie" signifie l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière. Le terme rhéologie a été inventé en 1920 par le professeur Eugene Bingham à Lafayette Collège dans l'Indiana aux États-Unis. Il s'est inspiré d'un collègue, Martin Reiner, professeur en langues classiques et histoire. Bingham, professeur de chimie, a étudié de nouveaux matériaux au comportement d'écoulement étrange, en particulier les peintures. La syllabe Rheo est du mot grec "rheîn", qui signifie flux, ainsi le nom de rhéologie a été pris pour. La rhéologie est également venue inclure la théorie constitutive des fluides très visqueux et des solides présentant des propriétés viscoélastiques [1].

Cette définition a été acceptée lorsque la société américaine de rhéologie a été fondée en 1929 [SOR (1930)] [2] [2]. Elle est apparue pour palier l'impuissance de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides à décrire les propriétés de matériaux intermédiaires entre solide et liquide [3], [4].

L'objet de la rhéologie est l'étude des processus par lesquels les matériaux dissipent ou emmagasinent l'énergie mécanique qu'ils reçoivent. Ces processus dépendent d'une part des modalités et de l'intensité de la perturbation mécanique à laquelle est soumis le matériau, d'autre part, à la structure de celui-ci. La perturbation mécanique provoque en premier lieu une réponse également mécanique du matériau ; toutes deux s'analysent en termes de déformations et de contraintes que nous définirons plus tard [5].

La dissipation de l'énergie se fait par frottements entre eux des différents éléments de la structure du matériau qui sont mis en mouvement ; elle correspond au phénomène d'écoulement, déformation irréversible, et lui est associée la notion de viscosité. A la capacité d'emmagasiner, sous une forme restituable, plus ou moins complètement et plus ou moins longtemps, l'énergie mécanique reçue correspondent la notion d'élasticité du matériau et le phénomène de déformation réversible; cette propriété découle de l'existence de liaisons

chimiques ou physiques entre les éléments structuraux: le système peut être assimilé à un réseau dont les nœuds auraient un caractère permanent (solides) ou transitoire (liquides) à l'échelle des temps d'observation, selon la nature des liaisons impliquées dans sa structure.

Plusieurs matériaux ou de « systèmes » se comportent à la fois de façon élastique et visqueuse (corps dits viscoélastiques).

La rhéologie consiste à déterminer la relation qui relie la contrainte de cisaillement au taux de déformation. Cette relation peut être linéaire ou non-linéaire dans le cas d'un fluide complexe comme une Confiture. Ces fluides complexes dits "non-newtonien" sont caractérisés différemment, parce que la viscosité n'est pas constante.

Dans cette partie, nous exposons les notions de base, dont l'objectif est la compréhension de la rhéologie des confitures. Nous exposons les grandeurs fondamentales de la rhéologie, quelques modèles rhéologiques et nous introduisons la viscoélasticité des matériaux[6].

### **I.3. Applications de la rhéologie**

- 
- 1 D'injection des matières
  - 2 Aliments et boissons
  - 3 Peintures et encres
  - 4 Les produits agrochimiques
  - 5 Produits pharmaceutiques
  - 6 Adhésifs, scellants et béton
  - 7 Industrie pétrochimique
  - 8 Transport dans les pipelines
  - 9 Cosmétiques et Produits de nettoyage
- 

### **I.4. La description du comportement rhéologique**

Le comportement rhéologique du matériau est considéré dans les conditions ainsi définies. Cela revient à étudier les relations entre les contraintes, les déformations et le temps : dans les cas les plus simples, ces relations peuvent se représenter sous la forme d'une équation mathématique dite équation constitutive du matériau.

L'analyse du comportement rhéologique en termes de structure du matériau et de ses modifications sous l'effet de la contrainte ou de la déformation. Cette analyse est le plus souvent très difficile car elle implique de passer de l'échelle macroscopique, qui est celle des propriétés rhéologiques mesurées.

#### I.4.1. Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement, souvent désignée par  $\tau$  (grec : tau), est la composante de la contrainte coplanaire à la section transversale d'un matériau. Elle provient de la force de cisaillement, la composante du vecteur force parallèle à la section transversale du matériau. La contrainte normale, quant à elle, provient de la composante du vecteur force perpendiculaire à la section du matériau sur lequel elle agit [7].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{I-1})$$

$\tau$  (prononcé: "tou"); avec la force de cisaillement  $F$  [N] et la surface de cisaillement  $S$  [m<sup>2</sup>], Ce qui suit est valable :  $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ [8].

##### I.4.1.2 Cisaillement plan

Une schématisation d'un exemple de cisaillement simple est présentée sur la (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il s'agit d'un fluide confiné entre deux plaques parallèles. Le plan supérieur est animé d'une vitesse tangentielle  $\vec{v}_0$ , et le plan inférieur est fixe. Considérons une couche fluide confinée entre deux plaques planes, parallèles et distantes d'une épaisseur  $e$ [6].

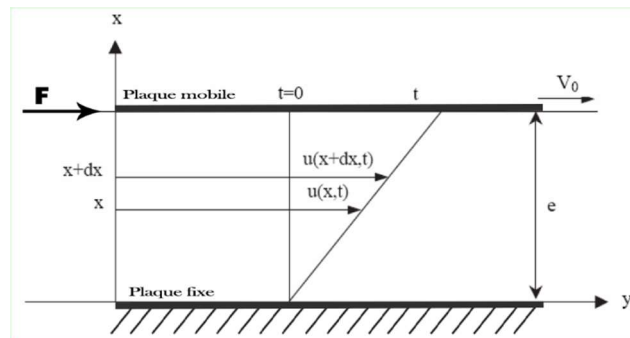


Figure I.1 : Mouvement laminaire de cisaillement plan [6].

Contrainte de cisaillement  $\tau = \tau_{xy}$  qui est une grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. D'autre part, la couche de matériau immédiatement en contact avec le plaque fixe

a une vitesse nulle, et la couche en contact avec la plaque mobile a une vitesse  $v$  : c'est la condition de non-glissement à la plaque :

$$\begin{aligned} v(x = 0) &= 0 \\ v(x = e) &= v_0 \end{aligned} \tag{I-2}$$

À un cisaillement par l'application d'une force  $F$  comme indiqué expliqué dans la (Figure I.2), celle-ci sera équilibrée par une force de frottement interne égale et opposée dans le fluide. Force de frottement interne égale et opposée dans le fluide. Pour un fluide newtonien incompressible dans un flux laminaire, le cisaillement résultant est le suivant laminaire, la contrainte de cisaillement résultante est égale au produit du taux de cisaillement et de la viscosité du fluide. Viscosité du fluide. Dans ce cas simple, le taux de cisaillement peut être exprimé comme le gradient de vitesse dans la direction perpendiculaire à celle de la force de cisaillement, c'est à dire, Si cet écoulement est laminaire, on peut découper le fluide en couches infiniment minces. Alors, la déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des couches les unes par rapport aux autres, sans transport de matière d'une couche à l'autre. Il en résulte des forces de frottement appelées forces de cisaillement qui s'exercent tangentielllement à la surface de chaque couche. Il est d'usage de rapporter ces forces à l'unité de surface sur laquelle elles s'exercent ; on définit ainsi la contrainte tangentielle[8].

La contrainte de cisaillement résultante est égale au produit du taux de cisaillement et de la viscosité du fluide. Dans cas fluide Newtonien, le taux de cisaillement peut être exprimé dans ce cas sous forme de gradient de vitesse dans la direction perpendiculaire à celle de la force de cisaillement, comme le montre la (Figure I.2), c'est-à-dire :

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A} = \tau_{xy} = \mu \frac{dV_x}{dy} = \mu \dot{\gamma}_{xy} \tag{I-3}$$

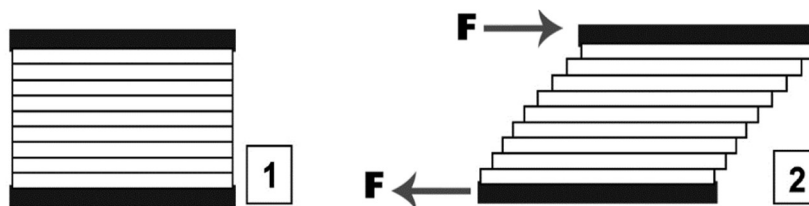


Figure I.2 : Ecoulement laminaire qui peut se produire dans une fente de cisaillement : (1) état au repos ; (2) écoulement laminaire homogène, montrant un taux de cisaillement [8].

## I.4.2 Taux de cisaillement

Le taux de cisaillement est défini comme le gradient de vitesse, c'est-à-dire la différence de vitesse entre les deux surfaces contenant le fluide, divisée par la distance qui les sépare, Comme le montre la (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), entre les deux plaques, forment des couches se au milieu de la matière la vitesse des couches augmente avec la distance au plaque fixe. Considérons un élément de volume infinitésimal situé à l'instant  $t=0$  à une distance  $X$  du plaque fixe. A un instant  $t$  ultérieur, ce volume aura parcouru la distance  $u(x, t)$ . On définit le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  en  $[S^{-1}]$  par la relation :

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_y}{\partial x} \quad (I-4)$$

Où la vitesse en  $[m/s]$  et la viscosité dynamique en  $[Pa \cdot S]$  s'écrivent :

$$v_y = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (I-5)$$

## I.4.3 Viscosité

### I.4.3.1 Définition

Pour tous les fluides en mouvement, les molécules présentent un mouvement relatif entre elles, et ce processus est toujours combiné à des forces de friction internes. Par conséquent, pour tous les fluides en mouvement, une certaine résistance à l'écoulement se produit, qui peut être déterminée en termes de viscosité. Tous les matériaux qui présentent clairement un comportement d'écoulement sont appelés fluides (donc : liquides et gaz)[8].

### I.4.3.2 Viscosité de cisaillement

Pour les fluides idéalement visqueux, mesurée à une température constante, la valeur du rapport de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et le taux de cisaillement correspondant  $\dot{\gamma}$  est une Constante matérielle. Définition de la viscosité de cisaillement :

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (I-6)$$

$\eta$  (eta, prononcé : "etah" ou "atah"), l'unité de viscosité de cisaillement est  $[Pas]$ , ("pascalsecondes").

La formule suivante s'applique :  $1Pas = 1N \cdot s/m^2 = 1kg/s \cdot m$ .

Dans le cadre de la mécanique des milieux continus, la distribution des contraintes et des déformations est représentée sous forme tensorielle. Les relations entre ces champs sont

appelées lois de comportement[3] .

Le tenseur des contraintes  $\underline{\underline{\Sigma}}$  se décompose en deux termes :

- i) la pression hydrostatique qui ne conduit pas à la déformation du fluide.
- ii) le déviateur des contraintes  $\underline{\underline{\tau}}$ , qui se rapporte aux contraintes tendant à déformer le fluide :

$$\underline{\underline{\Sigma}} = -p \cdot \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{\tau}} \quad (\text{I-7})$$

Avec (p) la pression et (I) le tenseur identité.

Au cours d'un écoulement, les éléments fluides peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres, ce qui conduit à l'obtention de vitesses différentes d'un point à un autre. Le tenseur gradient de vitesse  $\underline{\underline{\nabla \vec{u}}}$  est par conséquent non nul. Les termes de la diagonale caractérisent des efforts en traction ou en compression, alors que les autres représentent les efforts associés au cisaillement.

La loi de comportement, en général, relie le déviateur des contraintes  $\underline{\underline{\tau}}$  au tenseur des taux de déformation D défini comme la partie symétrique du tenseur gradient de vitesse :

$$\underline{\underline{D}} = \frac{1}{2} \cdot \left( \underline{\underline{\nabla \vec{u}}} + \left( \underline{\underline{\nabla \vec{u}}} \right)^T \right) \quad (\text{I-8})$$

La loi de comportement la plus simple est celle obtenue pour un fluide newtonien :

$$\underline{\underline{\tau}} = -2\eta \cdot \underline{\underline{D}} \quad (\text{I-9})$$

La forme tensorielle de la loi de comportement reste trop générale pour qu'elle puisse être caractérisée expérimentalement. C'est pourquoi, l'objectif de la rhéométrie est de réaliser des écoulements simples conduisant à une simplification de la forme des tenseurs. Dans le cas du cisaillement simple, on obtient la simplification suivante :

$$\underline{\underline{\tau}} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \underline{\underline{D}} = \frac{\dot{\gamma}}{2} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{I-10})$$

où  $\dot{\gamma}$  représente la vitesse (taux) de cisaillement est défini comme le gradient de vitesse, c'est-à-dire la différence de vitesse entre les deux surfaces contenant le fluide, divisée par la distance qui les sépare.[9]

Ou le gradient de vitesse. La contrainte tangentielle de cisaillement est définie par  $\tau_{xy}$ , généralement notée "  $\tau$  ". Les première et seconde différenc de contraintes normales sont

respectivement :

$$N_1 = \tau_{xx} - \tau_{yy} \text{ et } N_2 = \tau_{xx} - \tau_{zz} . \quad (\text{I-11})$$

## I.5 Classification du comportement des fluides

On peut classer les fluides de deux façons différentes ; en fonction de leur réponse à l'application d'une pression extérieure, ou selon les effets produits sous l'action d'une contrainte de cisaillement. Le premier type fluide Newtonien et la deuxième type fluide non-Newtonien, comme représentées sur la (Figure I.3).

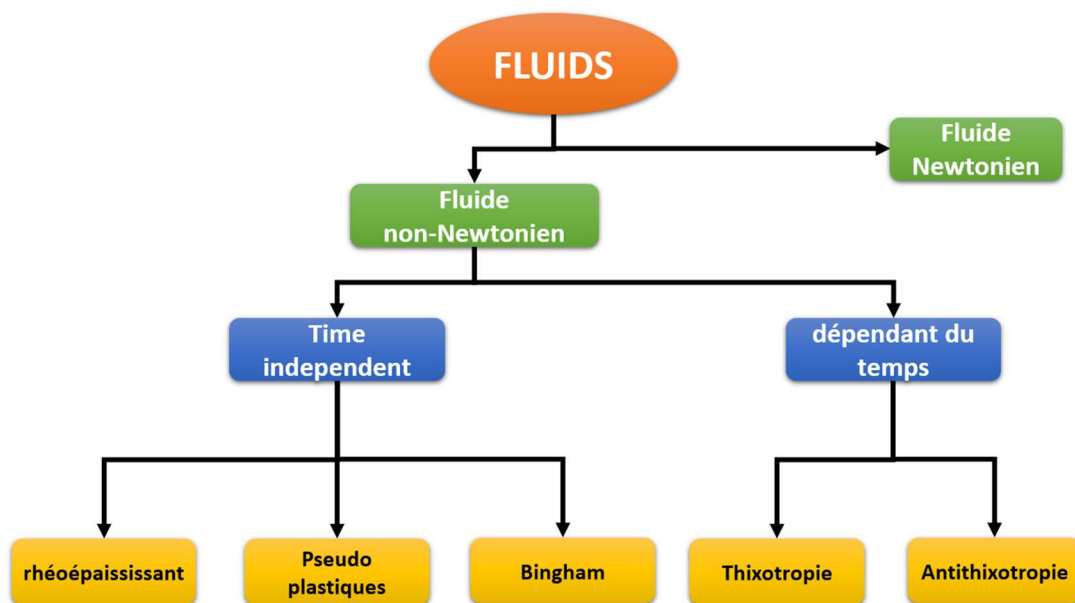


Figure I.3 : Classification des fluides en fonction de leur comportement d'écoulement.

### I.5.1 - Fluide Newtonien

Un liquide newtonien est un liquide dont la viscosité, bien que variant avec la température et la pression ne varie pas avec la vitesse de déformation ou le temps [10].

Cette catégorie de liquides obéit à la loi de Newton :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I-12})$$

Sa représentation graphique sera une courbe d'écoulement (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le rhéogramme  $\tau = f(\dot{\gamma})$  d'un tel fluide est donc une droite passant par l'origine, de pente  $\tan \alpha = \eta$ . C'est en général le cas des gaz et des liquides [11].

La viscosité néanmoins dépend d'autres facteurs tels que la température et la pression.

Exemples de fluides newtoniens : eau, miel.

### I.5.2 - Fluide non-Newtonien

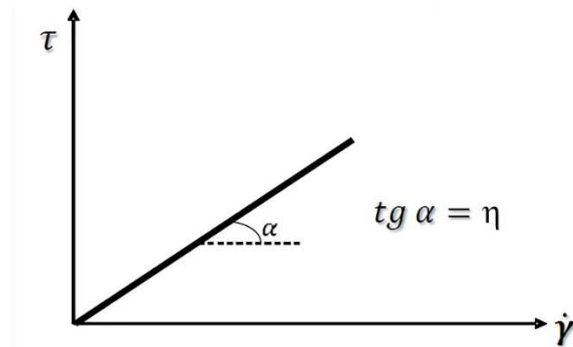


Figure I.4 : Courbe d'écoulement ou rhéogramme [11].

On dit d'un fluide qu'il est non-Newtonien lorsque sa courbe d'écoulement est non linéaire, c'est-à-dire que la viscosité n'est plus constante mais dépend des conditions d'écoulement, du taux de cisaillement et parfois même de l'histoire de l'élément fluide. La caractérisation rhéologique d'un fluide consiste à établir la relation qui existe entre sa déformation et la contrainte qui lui est appliquée. En fonction de sa réponse, il sera dit dépendant du temps ou non [12].

#### I.5.2.1 Fluides indépendants du temps

Le comportement rhéologique est indépendant de l'histoire mécanique antérieure de l'échantillon, des fluides pour lesquels le comportement rhéologique est indépendant de l'histoire mécanique antérieure de l'échantillon, le taux de cisaillement en un point du fluide quelconque est déterminé que par la valeur de la contrainte de cisaillement à ce point à cet instant. Ces fluides sont appelés fluides comportementaux.



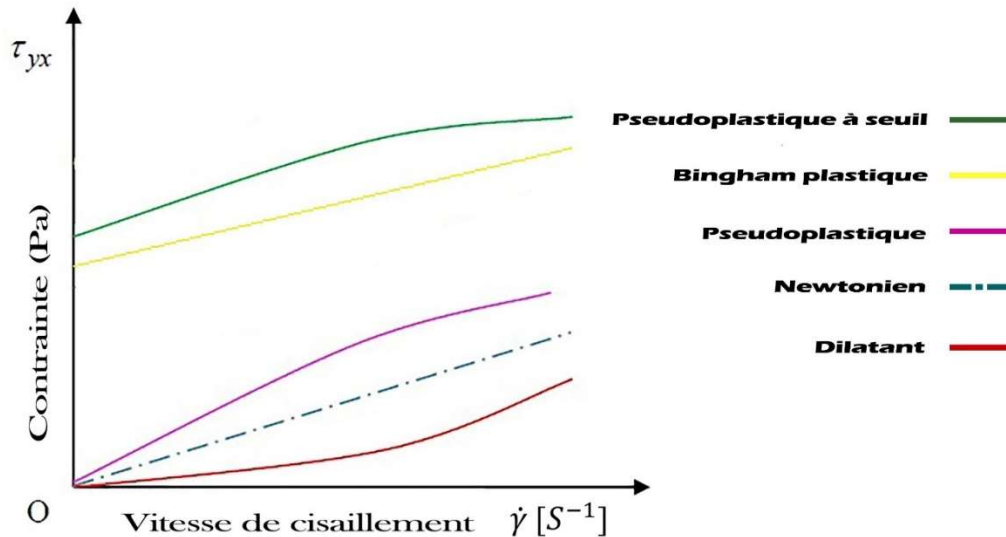


Figure I.5 : Types des comportements non-Newtoniens indépendants du temps

En cisaillement simple, le comportement à l'écoulement de cette classe de matériaux peut être décrit par une relation de la forme :

$$\dot{\gamma}_{yx} = f(\tau_{yx}) \quad (\text{I-13})$$

Ou encore

$$\tau_{yx} = f(\dot{\gamma}_{yx}) \quad (\text{I-14})$$

Cette équation implique que la valeur de  $\dot{\gamma}_{yx}$  à n'importe quel point à l'intérieur du fluide cisailé n'est déterminée que par la valeur correspondante de la contrainte de cisaillement à ce point ou vice versa. Selon la forme de la fonction dans l'équation (I-13) ou (I-14), ces fluides peuvent être subdivisés en trois types :

- rhéofluidifiant ou pseudoplastique,
- à seuil ou viscoplastique,
- rhéoépaississant ou dilatant.

Les courbes d'écoulement qualitatives aux échelles linéaires pour ces trois types de comportement des fluides sont représentées comme le montre la (Figure I.5), la relation linéaire typique des fluides newtoniens est également incluse [13].

#### I.5.2.1.1 Fluides rhéofluidifiants ou pseudoplastiques à seuil

Le type le plus courant de comportement de fluide non newtonien indépendant du temps observé est la pseudoplasticité ou l'amincissement par cisaillement, caractérisé par une viscosité apparente qui diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement.

Cela se produit aussi bien à des taux de cisaillement très faibles qu'à des taux très élevés, la

plupart des amincissements par cisaillement

### **I.5.2.1.2 Fluides viscoplastiques**

Ce type de comportement du fluide est caractérisé par l'existence d'une contrainte d'cisaillement ( $\tau_0$ ) qui doit être dépassée avant que le fluide ne se déforme ou ne s'écoule.

Inversement, un tel matériau se déformera élastiquement (ou s'écoulera en masse comme un corps rigide) lorsque la contrainte appliquée extérieurement est inférieure à la limite contrainte d'cisaillement ( $\tau_0$ ).

Une fois que l'amplitude de la contrainte externe a dépassé la valeur de la limite contrainte d'cisaillement ( $\tau_0$ ),

la courbe d'écoulement peut être linéaire ou non linéaire comme le montre la (Figure I.5) [13].

### **I.5.2.1.3 Fluides rhéoépaississant ou dilatant**

Fluides dilatants leur viscosité apparente augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement ; Ainsi, ces fluides sont également appelés épaississants par cisaillement. Bien que plus rare que la pseudoplasticité, la dilatance est observée dans les fluides contenant un haut taux de solides défloculés (séparés qui étaient précédemment associés), comme les boues d'argile, la fécule de maïs dans l'eau et l'eau sablonneuse. Une explication possible de leur comportement dilatant est la suivante :

Au repos, le vide est minimum et le liquide présent suffit à remplir l'espace vide.

À faible taux de cisaillement, le liquide lubrifie le mouvement de tous les particules solides et les contraintes résultantes sont par conséquent faibles. D'autre part, à des vitesses de cisaillement élevées, le matériau se dilate légèrement de sorte qu'il n'y a plus de liquide suffisant pour combler les espaces vides créés.

La conséquence est une augmentation du frottement et des contraintes de cisaillement résultant des contacts solides-solides entre particules (comme le montre schématiquement la (Figure I.6). Ce mécanisme amène la viscosité apparente à augmenter rapidement avec un taux croissant de cisaillement[13].

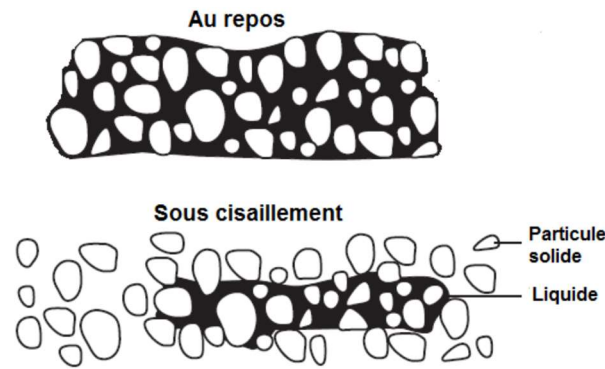


Figure I.6 : Représentation schématique du comportement dilatant [13].

### I.5.2.2 Fluides dépendant du temps

La description Comportement d'écoulement de fluide en fonction du temps de nombreux matériaux industriels importants

En pratique, la viscosité apparente peut dépendre non seulement du taux de cisaillement, mais aussi du temps pendant lequel le fluide a été soumis à un cisaillement et de l'histoire de l'échantillon [12, 13].

Le comportement dépendant du temps peut être subdivisé en deux catégories :

- 1- Les fluides thixotropes
- 2- Les fluides antithixotropes

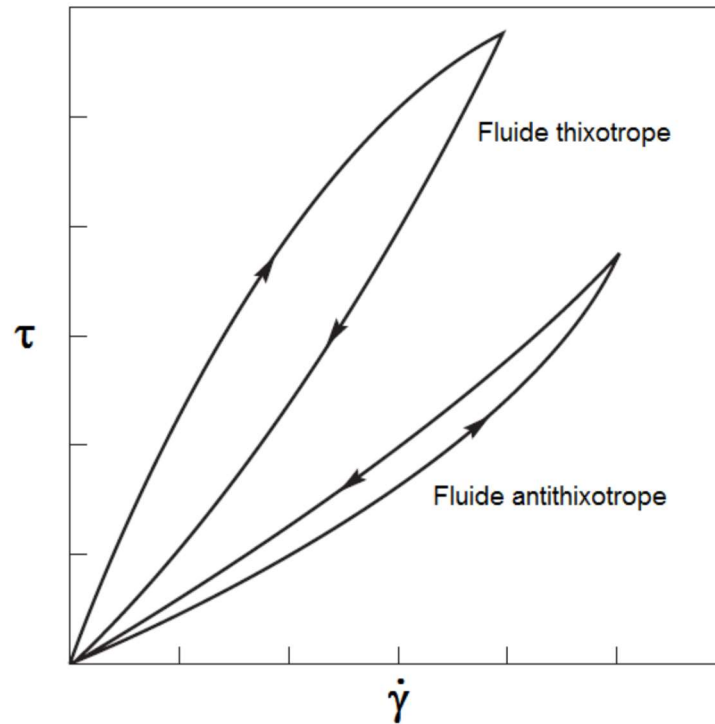
#### I.5.2.2.1 Les fluides thixotropes

La thixotropie est une propriété physique caractéristique des matériaux dont les propriétés d'écoulement varient avec le temps. Elle est présente dans certains gels, fluides ou mélanges fluides renfermant des inclusions solides (béton, sable mélangé à l'eau...).

Un fluide thixotrope subit une diminution de viscosité avec le temps, lorsqu'il est soumis à un cisaillement constant.

Si la courbe d'écoulement  $\tau = f(\dot{\gamma})$  est réalisée dans une seule expérience dans laquelle on augmente régulièrement la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  de zéro à une certaine valeur maximale, puis on la diminue progressivement pour atteindre zéro, une boucle d'hystérésis est obtenue de la forme représentée sur la (Figure I.7), [13].

Figure I.7 : Représentation schématique de la courbe  $\tau = f(\dot{\gamma})$ .  
Pour le comportement dépendant du temps [13].



#### I.5.2.2.2 Les fluides antithixotropes

C'est un fluide le comportement opposé du comportement thixotrope, en ce sens que la viscosité du fluide augmente avec le temps lorsqu'il est soumis à un taux de cisaillement continu et constant. Les fluides rhéopectiques sont assez rares. Encore une fois, des effets d'hystérésis sont observés dans la courbe d'écoulement inversé, par rapport à un matériau thixotrope, mais dans ce cas, comme on peut le voir sur la (Figure I.7), [13].

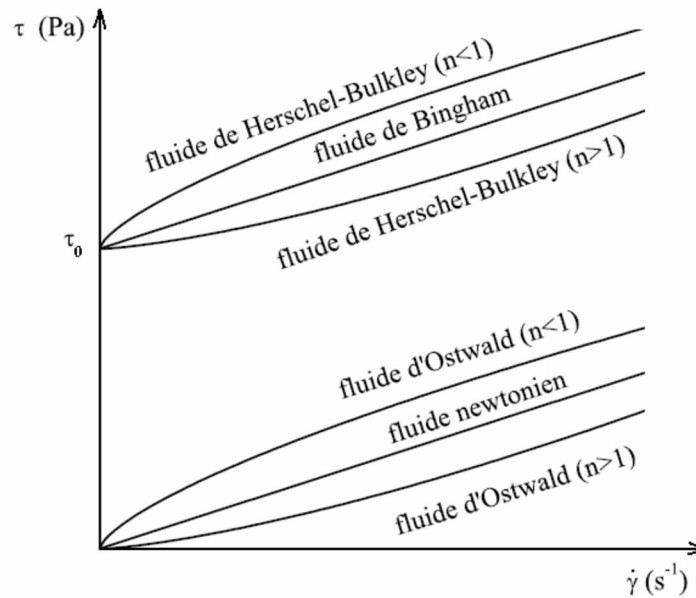


Figure I.8 : Lois de comportement élémentaires [6].

## I.6 Modèles rhéologiques

De nombreux modèles, reliant la contrainte de cisaillement  $\tau$  au gradient de cisaillement  $\dot{\gamma}$ , ont été développés afin de décrire les comportements rhéologiques les plus couramment rencontrés[6].

Le cas le plus simple correspond à celui des fluides newtoniens voir (Figure I.8), Cette catégorie de liquides obéit à la loi de Newton (I-12).

Viennent ensuite les fluides dont les propriétés ne dépendent pas du temps et dont la relation  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . Peut s'écrire en loi de puissance. Cette loi permet de décrire la rhéofluidification ou le rhéoépaississement d'un grand nombre de fluides. Un fluide est rhéofluidifiant lorsque sa viscosité apparente diminue avec le gradient de cisaillement. Cela peut être dû par exemple à l'alignement de molécules anisotropes dans le sens de l'écoulement ou à une destruction des structures moléculaires [14].

Un fluide rhéoépaississant voit sa viscosité apparente augmenter avec le cisaillement. C'est une caractéristique non-newtonienne plus rare que le caractère rhéofluidifiant. Le plus souvent, et pour décrire ces deux types de fluide, d'un point de vue phénoménologique, on utilise une loi de puissance, proposée par [15]. Elle a pour expression :

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I-15})$$

La viscosité s'écrit alors :  $\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{-(1-n)}$ . est une constante et  $n$  un exposant qui traduit l'écart au comportement newtonien pour lequel  $n=1$ . Si  $n < 1$  le fluide est rhéofluidifiant et si  $n > 1$

le fluide est rhéoépaississant. En réalité un fluide n'est en général rhéofluidifiant que pour une certaine gamme de taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  (Figure I.8). Pour les faibles cisaillements, on observe souvent un comportement newtonien, avec un plateau de viscosité à une valeur  $\eta_0$  appelée viscosité à cisaillement nul. Pour des cisaillements élevés on observe aussi un plateau de viscosité de valeur  $\eta_\infty$  appelée viscosité à cisaillement infini. Il existe d'autres modèles plus sophistiqués que la loi de puissance pour décrire le comportement de la viscosité en fonction du cisaillement [14] ;[4].

Le modèle de Carreau-Yassuda [16] et [17], par exemple, tiennent compte du plateau de la viscosité à cisaillement nul et infini.

Ils s'écrivent respectivement :

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = (1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^a)^{(n-1)/a} \quad (\text{I-16})$$

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + \lambda \cdot \dot{\gamma}^n} \quad (\text{I-17})$$

Où  $a$  et  $n$  sont des constantes,  $\lambda$  est un temps caractéristique de relaxation et  $\eta_0$  et  $\eta_\infty$  sont respectivement la viscosité à cisaillement nul et à l'infini en [Pa. s].

Les modèles d'Ostwald-de Waele, de Carreau-Yassuda et de Cross représentent des comportements sans contrainte seuil. Dans le cas des "fluides à seuil" on ajoute la contrainte seuil ( $\tau_0$ ). Si la contrainte appliquée reste inférieure à cette valeur critique ( $\tau_0$ ), le matériau se comporte comme un solide. Dans le cas contraire, le matériau retrouve le comportement d'un fluide. Les deux modèles les plus utilisés pour caractériser les fluides à seuils sont, respectivement, le modèle de [18] et le modèle de [19], voir (Figure I.8).

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \\ \tau &= \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \end{aligned} \quad (\text{I-18})$$

Où  $\eta_{pl}$  est la viscosité plastique,  $k$  la consistance du fluide et  $n$  l'indice d'écoulement. Ces deux modèles permettent de représenter le comportement rhéologique de beaucoup de fluides au delà de la contrainte seuil. On note qu'on peut trouver dans la littérature beaucoup d'autres modèles avec différents paramètres (phénoménologiques ou d'ajustement) [20] ; [21]. Nous-mêmes avons proposé un modèle dérivé du modèle de Herschel-Bulkley pour mieux représenter, à la fois les petites et les grandes déformations, pour les fluides à seuils

telles que les suspensions argileuses [22].

## I.7 Technique de mesure rhéologique

Pour mesurer la viscosité Par l'intermédiaire de rhéomètres ou viscosimètres, on réalise des écoulements qui permettent, à partir de considérations géométriques et d'hypothèses sur l'écoulement, de relier les paramètres macroscopiques (vitesse de rotation, débit, couple, différence de pression) [6].

Paramètres régissant les lois de comportement que sont en général la contrainte de cisaillement  $\tau$  et le gradient de vitesse  $\dot{\gamma}$

- 1- Rhéomètre capillaire : est un appareil destiné à la mesure de la viscosité en cisaillement et d'autres propriétés rhéologiques. Dont le principe est basé sur l'écoulement dans une conduite cylindrique.
- 2- Rhéomètres rotatifs dans lesquels le fluide est soumis à un cisaillement entre deux surfaces, l'une fixe et l'autre en rotation par rapport à son axe En pratique, ces deux surfaces sont couramment un plan et un cône ou deux plans [3].

Les rhéomètres rotatifs sont classés en deux familles

- Rhéomètres à déformation imposée
- Rhéomètres à contrainte imposée

### I.7.1 Essais de rotation

Essais de rotation où les deux plans de cisaillement de la géométrie de mesure tournent l'un par rapport à l'autre l'une fixe et l'autre en rotation par rapport à son axe [23].

Essais de rotation sont classés en deux typrs :

#### I.7.1.1 Essais à taux de cisaillement imposé

Essais à taux de cisaillement contrôlé Lors de l'exécution d'essais, la vitesse de rotation ou le taux de cisaillement, respectivement, est pré réglé et contrôlée par le rhéomètre voir (Tableau I.1). Cette méthode d'essai est appelée "taux de cisaillement contrôlé

La méthode d'essai avec taux de cisaillement contrôlé est généralement sélectionnée si le liquide à mesurer à une vitesse d'écoulement ou un taux de cisaillement souhaité, respectivement. C'est le cas, si certaines conditions de processus doivent être simulées, par exemple, se produisant avec un écoulement de tuyau, ou lors de la peinture et de la pulvérisation [24].

Tableau I.1 : Données brutes et paramètres rhéologiques des essais de rotation à taux de cisaillement imposée [24].

<b>Essais à taux de cisaillement imposée</b>	<b>Préréglage d'essai</b>	<b>Résultats</b>
<b>Données brutes</b>	<b>Vitesse de rotation <math>n</math> [min<sup>-1</sup>]</b>	<b>Couple <math>M</math> [N.m]</b>
<b>Paramètres rhéologiques</b>	<b>Taux de cisaillement <math>\dot{\gamma}</math> [s<sup>-1</sup>]</b>	<b>Contrainte de cisaillement <math>\tau</math> [Pa]</b>
<b>Calcul de la viscosité</b>		$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ [Pa. S]

### I.7.1.2 Essais contrainte de cisaillement imposé

Lors de l'exécution d'essais avec une contrainte de cisaillement contrôlée, est préréglée la force motrice via le couple ou la contrainte de cisaillement, le couple ou la contrainte de cisaillement, respectivement, est préréglé et contrôlé par le rhéomètre voir (Tableau I.2). Cette méthode d'essai est appelée "essai de contrainte de cisaillement contrôlé",

Il s'agit de la méthode « classique » pour déterminer les limites d'élasticité des dispersions, des pâtes ou des gels.

Dans la nature, presque tous les processus d'écoulement sont contrôlés par la contrainte de cisaillement, car tout mouvement - fluage ou écoulement - est principalement une réaction à une force agissante.

Tableau I.2 : Données brutes et paramètres rhéologiques des essais de rotation avec contrainte de cisaillement imposée [24].

<b>Essais contraints de cisaillement imposée</b>	<b>Préréglage d'essai</b>	<b>Résultats</b>
<b>Données brutes</b>	<b>Couple <math>M</math> [N.m]</b>	<b>Vitesse de rotation <math>n</math> [min<sup>-1</sup>]</b>
<b>Paramètres rhéologiques</b>	<b>Contrainte de cisaillement <math>\tau</math> [Pa]</b>	<b>Taux de cisaillement <math>\dot{\gamma}</math> [s<sup>-1</sup>]</b>
<b>Calcul de la viscosité</b>		$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ [Pa. S]

## I.8 Glissement aux parois

Le phénomène de glissement le plus couramment rencontré lors de l'étude rhéologique des fluides. La surface de la forme géométrie de mesure est généralement lisse. Contact de ces surfaces avec de l'échantillon peut provoquer un glissement aux parois.

Ou alors Le phénomène se produit en fonction de la viscosité du l'échantillon et de la vitesse



de rotation de géométrie de mesure mobiles. Le résultat du cisaillement préférentiel d'une fine couche du l'échantillon testé près des parois.

Ce problème peut entraîner des erreurs de mesure et d'interprétation Résultats, spécialement pour les l'étude des fluides à seuil avec un rhéomètre à contrainte, imposée [25] [26]. Dans le cas des suspensions, le glissement peut être favorisé par la migration des particules des régions pariétales (décroissance de la concentration solide près de la paroi lisse), effet connu sous la dénomination d'effet sigma, Cet effet a été abordé par beaucoup d'auteurs [6].

Le phénomène de glissement peut se manifester dans des situations très diverses et pour tout type de matériau : polymères de grande masse molaire, suspensions, gels, crèmes cosmétiques [27].

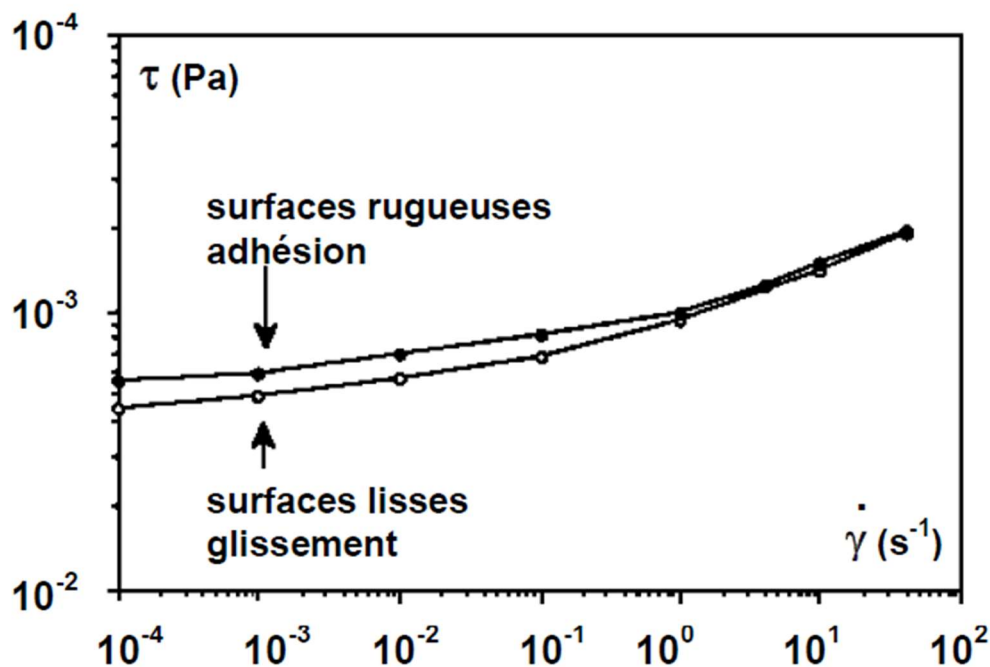


Figure I.9 : Mise en évidence du glissement d'un fluide à seuil. Rhéométrie rotative à vitesse imposée en géométrie cône-plan [27].

Montre l'évolution de la contrainte à la paroi pour un fluide viscoplastique, présentant un seuil à faible gradient de cisaillement et un comportement rhéofluidifiant à gradient de cisaillement élevé. Les résultats ont été obtenus en régime de cisaillement simple, dans un rhéomètre à vitesse contrôlée, avec des géométries cône/plan.

Les géométries utilisées sont en acier inoxydable ; l'une d'entre elle a subi un traitement de surface augmentant notablement sa rugosité voir (Figure I.9), afin de mettre en évidence la différence entre surfaces rugueuses adhésion et surfaces lisses glissement.

## I.9 Problème d'évaporation

Lorsque l'échantillon est en contact direct avec l'atmosphère, il est affecté par l'évaporation en fonction de la température environnante, de la pression et de l'hygrométrie de l'air ambiant. Plus l'entrefer est large, plus la surface libre est grande.

Ce problème peut conduire à une augmentation de la concentration massique et une diminution du volume de l'échantillon, et ceci entrainera l'augmentation de la viscosité de l'échantillon, surtout lorsque les essais sont longs et la substance reste longtemps exposée à l'air[28].

Pour pallier ce problème et minimiser les erreurs de mesure, la solution est fréquemment utilisées consistent soit à travailler sous atmosphère saturée par le fluide interstitiel ou à placer un film liquide sur les surfaces libres Comme le montre (Figure I.10), [29] [6].

Nous avons opté pour la mise en place de notre dispositif de mesure dans une ambiance saturée en vapeur d'eau au cours de tous les essais.

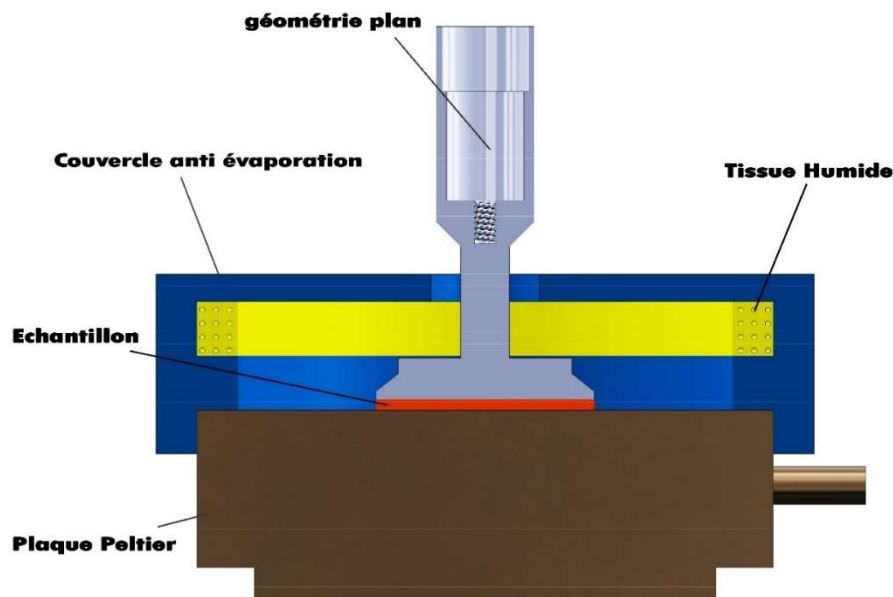


Figure I.10 : Techniques de diminution de l'évaporation

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tenté de cerner, certains outils mathématiques et physiques à même de faciliter la compréhension et l'étude des fluides non-Newtoniens et nous avons également exposé des Informations générales sur la rhéologie et divers problèmes que l'on peut rencontrer en rhéologie expérimentale.

Dans le chapitre suivant, nous passerons en revue le modèle rhéologique intervenant dans nos études, ainsi que le rhéomètre et géométrie de mesure utilisé.

# **Chapitre II : Généralités sur la rhéométrie rotative**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous commençons par l'histoire des rhéomètres rotatifs et ce que sont les rhéomètres rotatifs et les types de débitmètres tels que les rhéomètres rotatifs à cylindre axial, les rhéomètres rotatifs planaires coniques et les rhéomètres planaires rotatifs, et nous nous familiarisons avec la mesure des rhéomètres disponibles au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique (ptapc.crapc.biskra) est un rhéomètre rotatif pouvant supporter un système planaire et un système plan conique. Son nom commercial est "Rhéomètre hybride Discovery (HR 20) TA Instruments". L'objectif spécifique est de comprendre son potentiel, puis de l'expliquer de manière claire.

## II.2 Historique

Le mot rhéomètre vient du grec et signifie un appareil pour mesurer le débit. (Source principale : Oxford English Dictionary).

L'histoire du développement du rhéomètre a commencé lorsque des programmeurs analogiques et des enregistreurs en ligne pour tracer des courbes de débit ont été sur le marché, depuis environ 1970. Vers 1980, des instruments à commande numérique sont apparus qui ont permis de stocker les données de mesure et d'utiliser un variété de méthodes d'analyse, une développement du premier rhéomètre a été développée par Sridhar et Gupta (1985) pour des mesures sur des solutions de polymères à très faible viscosité ( $\sim 5$  cP), et puis la technologie de mesure est en constante évolution, et dans le même temps, grâce à des systèmes et procédures de mesure standardisés, les résultats de mesure peuvent aujourd'hui être comparés dans le monde entier [30] [24].

## II.3 Rhéomètre

La rhéométrie est la technologie de mesure utilisée pour déterminer les données rhéologiques, Cela se fait à travers on réalise des écoulements qui permettent à partir de considérations géométriques et d'hypothèses sur l'écoulement, de relier les paramètres macroscopiques (couple, vitesse de rotation, débit, différence de pression), paramètres régissant les lois de comportement que sont en général la contrainte de cisaillement  $\tau$  et le gradient de vitesse  $\dot{\gamma}$  [6].

Il est utilisé pour les fluides qui ne peuvent pas être définis par une seule valeur de viscosité et nécessitent donc plus de paramètres à régler et à mesurer que ce n'est le cas pour un

viscosimètre. Il mesure la rhéologie du fluide.

Il existe deux types distincts de rhéomètres. Les rhéomètres qui imposent un cisaillement contrôlé ou la contrainte de taux de cisaillement contrôlé.

La motivation de toute étude rhéométrique est souvent l'espoir que le comportement observé dans des situations industrielles puisse être corrélé avec une fonction rhéométrique facilement mesurable. La rhéométrie est donc d'une importance potentielle dans le contrôle de la qualité et le contrôle des processus. Il est également d'une importance potentielle dans l'évaluation de l'utilité de tout modèle constitutif proposé pour le matériau d'essai, qu'il soit basé sur des idées moléculaires ou de continuum. Indirectement, la rhéométrie peut donc être pertinente dans la modélisation des procédés industriels. Ce sera particulièrement le cas à l'avenir lorsque le plein potentiel de la dynamique des fluides computationnelle à l'aide de grands ordinateurs sera réalisé dans un contexte rhéologique [31] [24].

## II.4 Ensemble de mesure de la rhéométrie rotative

### II.4.1 Général

Les propriétés rhéologiques sont étudiées à l'aide d'un système de mesure composé d'un appareil de mesure (viscosimètre ou rhéomètre) et d'une géométrie de mesure (par exemple cône-plan).

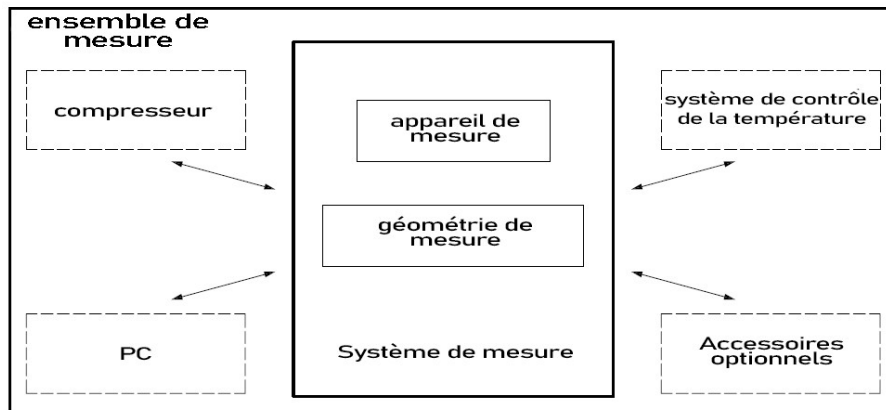
Le viscosimètre ne peut mesurer que la viscosité en rotation (viscosimétrie). Cela signifie que la fonction de viscosité de l'échantillon peut être déterminée en fonction des paramètres de temps, de température, de vitesse de cisaillement, de contrainte de cisaillement et d'autres tels que la pression.

Avec un rhéomètre, il est possible d'effectuer tous les tests de base en rotation et en oscillation (rhéométrie). Outre la fonction de viscosité, les propriétés viscoélastiques peuvent être déterminées, par ex. module de stockage en cisaillement et module de perte en cisaillement.

Un ensemble de mesure, composé d'un appareil de mesure, d'une géométrie de mesure et d'accessoires optionnels, est illustré à la (Figure II.1). L'appareil de mesure et les composants individuels, tels que le système de contrôle de la température, peuvent être contrôlés par ordinateur.

Un ensemble de mesure, composé d'un appareil de mesure, d'une géométrie de mesure et d'accessoires optionnels, est illustré à la (Figure II.1) L'appareil de mesure et les composants individuels, tels que le système de contrôle de la température, peuvent être contrôlés par

ordinateur.



L'échantillon à étudier se trouve dans un espace de mesure où un profil d'écoulement défini est généré dans l'échantillon. Une condition préalable nécessaire pour cela est une largeur d'espace suffisamment petite. Lorsque des viscosimètres ou des rhéomètres sont utilisés, ils

doivent pouvoir imposer ou détecter un couple ou une vitesse de rotation/déviations angulaires. Le paramètre imposé doit être réglable à la fois de manière dépendante du temps et indépendante du temps.

Pour les mesures viscosimétriques, tous les viscosimètres conviennent principalement, quelle que soit la manière dont l'unité d'entraînement et/ou de détection est prise en charge. Pour les mesures en oscillation, des rhéomètres doivent être utilisés qui ont le plus faible frottement interne possible dans l'unité d'entraînement ou de détection.

Pour couvrir la gamme d'applications la plus large possible, le viscosimètre ou le rhéomètre doit pouvoir travailler avec différentes géométries de mesure. La plage des couples ou des déviations angulaires qui en résultent et la plage de mesure pouvant être atteinte dépendent du système de mesure. Le type d'appareil de mesure et la géométrie de mesure à sélectionner dépendent de l'échantillon.

#### II.4.2 Systèmes de contrôle de la température

Un système de régulation de la température se compose d'un ou plusieurs composants de régulation de la température pour le chauffage et/ou le refroidissement, y compris les fluides nécessaires (par exemple, l'air, l'eau, l'azote liquide) et les raccords nécessaires (par exemple, les tuyaux et l'isolation de ces tuyaux).

Les propriétés rhéologiques de l'échantillon dépendent de la température. En conséquence,

des mesures telles que le contrôle de la température de l'échantillon et sa mesure avec un ou plusieurs capteurs de température à proximité immédiate de l'échantillon sont nécessaires.

La température de l'échantillon doit être maintenue constante en fonction du temps pendant la période de mesure.

## **II.5 Types de rhéomètre rotatifs**

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 :

### **II.5.1 Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux**

#### **II.5.1.1 Définition**

Un cylindre MS se compose d'un cylindre intérieur (bob) et d'un cylindre extérieur (cup), voir (Figure II.2).

Les cylindres concentriques signifient que les deux composants en forme de cylindre montrent le même axe de symétrie ou axe de rotation.

Le liquide est placé dans l'espace annulaire d'un cylindre à l'intérieur d'un autre. L'un des cylindres est mis en rotation à une vitesse définie. Cela détermine le taux de cisaillement à l'intérieur de l'espace annulaire. Le liquide a tendance à entraîner l'autre cylindre autour, et la force qu'il exerce sur ce cylindre (couple) est mesurée, qui peut être convertie en un taux de cisaillement.

Il est largement utilisé dans l'industrie pétrolière pour déterminer le caractère d'écoulement des fluides de forage. D'autres types mesurent à plus de vitesse et permettent d'obtenir une courbe de débit d'équilibre. Certains modèles permettent d'augmenter et de diminuer la vitesse en continu de manière programmée, ce qui permet de mesurer des propriétés dépendant du temps [31].



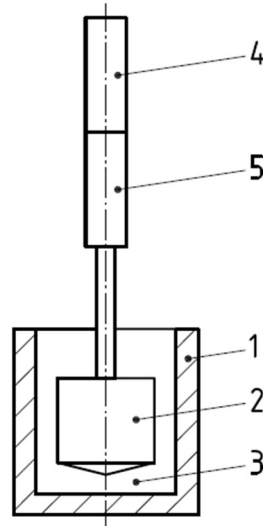


Figure II.2 : Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux [32].

1	Tasse à mesurer (cylindre extérieur).
2	Bob de mesure (cylindre intérieur).
3	Chambre d'échantillon.
4	Conduire.
5	Capteur de mesure.

### II.5.1.2 Avantages et inconvénients de Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux [32].

#### II.4.1.2.1 Avantages

- Détermination des valeurs mesurées absolues.
- Les erreurs de manipulation dues au surremplissage et au sous-remplissage sont plus faibles que pour les géométries de mesure cône-plan et plan-plan.
- Presque aucune influence de l'évaporation en raison de la faible surface limite par rapport au volume de l'échantillon.
- La plage de viscosité allant des viscosités faibles aux viscosités élevées peut être couverte en faisant varier les dimensions de la géométrie de mesure des cylindres coaxiaux.
- Faible répartition des taux de cisaillement dans l'entrefer de mesure par rapport à la géométrie de mesure plaque-plaque.

---

### II.5.1.2.1 Inconvénients

---

- En fonction de la sensibilité de l'appareil de mesure et de la géométrie de mesure utilisée, un volume d'échantillon plus important est requis qu'avec les géométries de mesure cône-plan et plan-plan.
  - Inertie de masse généralement plus élevée par rapport aux géométries de mesure cône-plan et plan-plan.
  - Nettoyage plus laborieux par rapport aux géométries de mesure cône-plan et plan-plan.
  - Des vitesses de chauffage et de refroidissement plus faibles peuvent être réalisées et, par conséquent, des temps de contrôle de la température plus longs sont nécessaires en raison du plus grand volume d'échantillon et des dimensions plus importantes de la géométrie de mesure par rapport aux géométries de mesure cône-plan et plateau-plan.
  - Risque de piégeage de bulles d'air lors de l'insertion du rotor dans l'échantillon.
- 

## II.5.2 Les rhéomètres rotatifs cône-plan

### II.5.2.1 Définition

Mooney et Ewart (1934) semblent avoir été les premiers à suggérer la géométrie du cône et du plateau pour les mesures de viscosité [32].

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre un cône et un plan systèmes de mesure à cône et plan sont décrites par les normes ISO 3219 (2021).

Géométrie des systèmes cône-plan Un cône et plaque se compose d'un cône circulaire relativement plat et d'une plaque.

Habituellement, le cône en tant que rotor est la partie supérieure de la géométrie de mesure et la plaque inférieure est la partie fixe qui est montée sur le support du rhéomètre. Les dimensions de la zone légèrement conique sont définies par le rayon du cône  $R$  et l'angle du cône  $\alpha$  voir (Figure II.3) [24].

L'angle entre le cône et la plaque (angle de cône) doit être le plus petit possible et en aucun cas supérieur à  $5^\circ$ . L'influence du frottement entre la pointe du cône et la plaque est évitée par la pointe du cône aplati (cône tronqué). La pointe et l'angle du cône aplati créent l'écart de mesure spécifié pour le cône individuel. Voir la (Figure II.3) pour plus de détails. La

mesure dans laquelle la pointe du cône diminue, c'est-à-dire la distance entre la pointe du cône aplati et la plaque, a un impact sur le résultat de la mesure [33].

Le liquide est placé sur une plaque horizontale et un cône peu profond y est placé. L'angle entre la surface du cône et la plaque est de l'ordre du degré  $\alpha$  - c'est-à-dire qu'il s'agit d'un cône très peu profond. Généralement, la plaque est tournée et la force sur le cône est mesurée. Une version bien connue de cet instrument est le rhéogoniomètre de Weissenberg, [31].

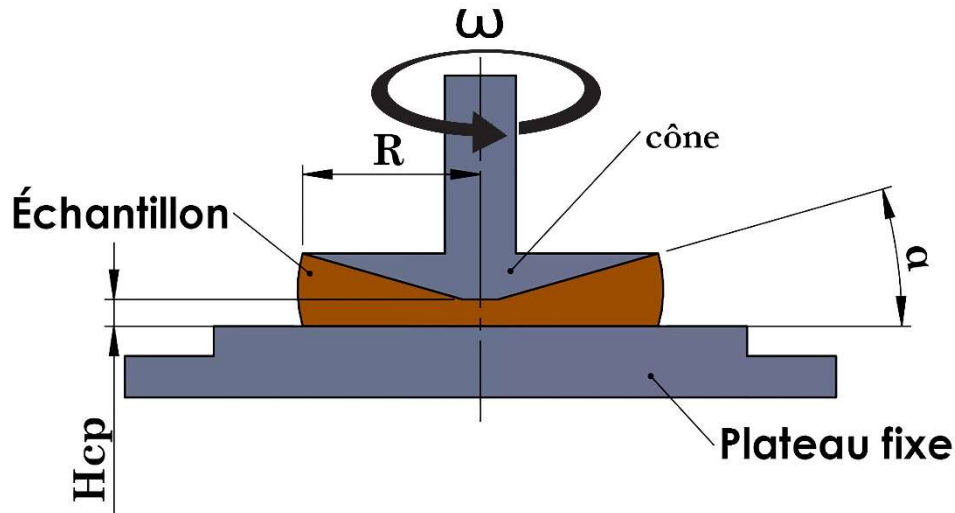


Figure II.3 : Caractéristiques de la géométrie cône-plan

<b>R</b>	Rayon de la géométrie cône.
<b><math>\alpha</math></b>	Angle de cône.
<b>Hcp</b>	Distance entre la pointe du cône aplati et la plaque.
<b><math>\omega</math></b>	La vitesse de rotation du cône.

### II.5.2.2 Méthode de calcul

La dérivation de la contrainte de cisaillement ou du taux de cisaillement pour cette géométrie de mesure cône-plan est présentée. Pour les angles de cône  $> 3^\circ$ , les formules exactes (II-1) et (II-2) doivent être utilisées [33].

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\delta} \omega \quad (\text{II-1})$$

$$\tau = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot R^3} M \quad (\text{II-2})$$

$\delta$	Est l'angle du cône
$\omega$	La vitesse de rotation du cône ou du plateau
<b>M</b>	Le couple imposé sur le cône
<b>R</b>	Le rayon du cône

### II.5.2.3 Quand utiliser le rhéométrie rotative cône-plan

Tableau II.2 : Quand utiliser le rhéométrie rotative cône-plan [34].

1	Liquides de viscosité très faible à élevée
2	Mesures de taux de cisaillement élevé
3	Croissance normale du stress
4	Échantillons non remplis
5	Tests isothermes
6	Petit volume d'échantillon

### II.5.2.4 Avantages et inconvénients de Rhéométrie rotative cône-plan

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de Rhéométrie rotative cône-plan [27] [33].

#### II.5.2.4.1 Avantages

- Le gradient de cisaillement est uniforme et constant dans l'entrefer entre le cône et le plan.
- Permet une mesure directe et simple de la première différence de contraintes normales.
- Démontage et contrôle visuel simples de la géométrie.
- Temps de contrôle de la température plus courts pour le chauffage et le refroidissement

#### II.5.2.4.1 Inconvénients

- Les recirculations se développent en particulier pour les cônes ayant un angle important,
- Présence d'une surface libre,
- Forte influence de l'évaporation potentielle du solvant en raison d'une surface limite plus grande par rapport au volume de l'échantillon.
- Difficulté de mise en place pour les systèmes très consistants du fait du développement des contraintes normales

### II.5.3 Les rhéomètres rotatifs plan-plan

#### II.5.3.1 Définition

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre deux plans parallèles caractérisés par leur rayon  $R$  et l'entrefer  $h$  entre ces deux plans voir la (Figure II.4).

L'un des plans est à l'arrêt, l'autre est en rotation à la vitesse angulaire  $\Omega$  [27].

Cette géométrie est mieux adaptée pour les suspensions.

Systèmes de capteurs à plaques parallèles il est déterminé par le rayon de la plaque  $R$  et la distance  $h$  entre les plaques. Cette distance  $h$  peut être variée. Il ne doit pas être inférieur à 0,3 mm, sinon des erreurs de mesure importantes liées à la nature de l'échantillon ne peuvent être évitées. Les systèmes de capteurs à plaques parallèles sont choisis à la place des systèmes de capteurs à cône et plaque si des échantillons contenant des particules de charge plus grosses doivent être mesurés rhéologiquement. La taille de l'espace choisie doit être au moins 3 fois plus grande que la plus grande taille de particule [35].

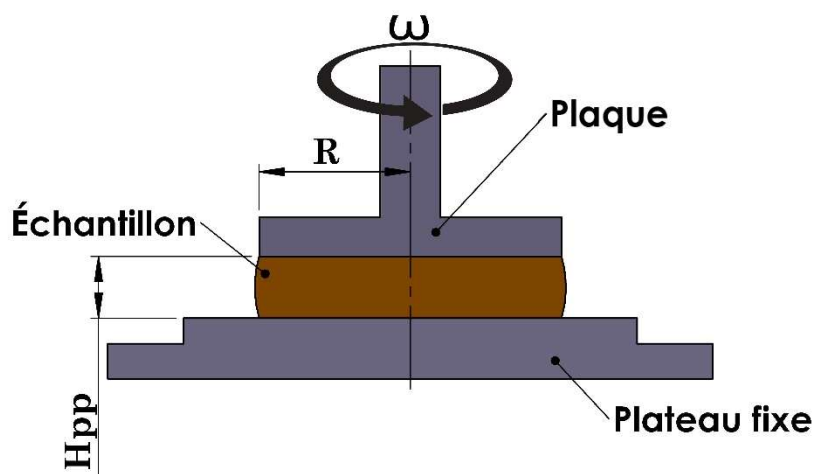


Figure II.4 : Caractéristiques de la géométrie plan-plan.

<b>R</b>	Rayon de la géométrie plan
<b>Hpp</b>	Distance entre ces deux plans
<b><math>\omega</math></b>	La vitesse de rotation du plan

#### II.5.3.2 Méthode de calcul

Pour les liquides non newtoniens, la correction de Rabinowitsch Weissenberg [36] doit être effectuée pour le calcul de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et du taux de cisaillement .

Les formules (II-3) et (II-4) peuvent être utilisées pour ces calculs uniquement pour les

liquides newtoniens et, en plus, uniquement pour le bord extérieur de la plaque :

$$\dot{\gamma} = \frac{R}{h} \omega \quad (\text{II-3})$$

$$\tau = \frac{2}{\pi \cdot R^3} M \quad (\text{II-4})$$

### II.5.3.3 Quand utiliser le rhéométrie rotative plan-plan

Tableau II.4 : Quand utiliser le rhéométrie rotative plan-plan [34].

1	Viscosité faible/moyenne/élevée
2	Liquides
3	Solides mous/gels
4	Matériaux thermodurcissables
5	Échantillons avec de grosses particules
6	Échantillons avec un long temps de relaxation
7	Rampes/balayages de température
8	Les matériaux qui peuvent glisser
9	Plaques hachurées ou sablées
10	Petit volume d'échantillon

### II.5.3.4 Avantages et inconvénients de rhéométrie rotative plan-plan

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients de rhéométrie rotative plan-plan [27] [33].

#### II.5.3.4.1 Avantages

1. La valeur de l'entrefer peut être adaptée au type d'échantillon manipulé.
2. Permet une mesure indirecte de la seconde différence de contraintes normales.
3. Démontage et contrôle visuel simples de la géométrie.
4. Différentes conceptions et matériaux spéciaux sont possibles, par ex. assiettes à usage unique en aluminium, assiettes en verre de quartz, assiettes en acrylique.
5. La mesure d'échantillons grossièrement dispersés est possible

#### II.5.3.4.2 Inconvénients

1. Le gradient de cisaillement n'est pas le même dans tout l'entrefer.
2. Présence d'une surface libre

## II.6 Rhéomètre hybride Discovery (HR 20)

Le modèle HR 20 comme le montre la (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) est un rhéomètre polyvalent, utilisé pour les fluides qui ne peuvent pas être définis par une seule valeur de viscosité et nécessitent donc plus de paramètres à régler, Il existe deux types de techniques de mesures distincts qui contraintes de cisaillement imposé ou vitesse de cisaillement imposé, avec l'analyse mécanique dynamique linéaire

Il utilisé pour les laboratoires de recherche et développement au déploiement continu des sites de contrôle de production.

Le modèle HR 20 peut relever tous les défis, qu'il s'agisse de compléter la rhéologie de cisaillement ou de tester des solides sous tension, compression ou flexion [37].



Figure II.5 : Rhéomètre hybride Discovery (HR 20) TA Instruments [38].

## II.7 Les spécifications du Rhéomètre hybride Discovery (DHR) HR20

Tableau II.6 : Les spécifications Rhéomètre hybride Discovery (DHR) HR20 [38].

Type de palier, axial	Magnétique
Type de palier, radial	Carbone poreux
Type de moteur	A Induction en cloche (Drag Cup)
Couple minimal (nN.m) Oscillation	1
Couple minimal (nN.m) Ecoulement	3
Couple maximal (nN.m)	200
Résolution de couple (nN.m)	0.1
Fréquence minimale (Hz)	1.0E-07
Fréquence maximale (Hz)	100
Vitesse angulaire minimale [1] (rad/s)	0
Vitesse angulaire maximale (rad/s)	300
Capteur de déplacement	Codeur optique
Encodeur optique	Standard
Résolution du déplacement (nrad)	2
Constante de temps en saut de déformation [2] (ms)	15
Constante de temps en saut de déformation [2] (ms)	5
Capteur de force normale/axiale	FRT
Force normale maximale (N)	50
Sensibilité en force normale (N)	0.005
Résolution en force normale (mN)	0.5

[1] Zéro en mode contrainte imposée. En mode vitesse imposée, dépend de la durée du point mesuré et du temps d'acquisition.

[2] Résultats à 99 % de la valeur commandée.



## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de déterminer ce que sont les rhéomètres rotatifs et les types de rhéomètres rotatifs, leurs avantages et inconvénients et quand les utiliser, et d'identifier les rhéomètres utilisés dans notre étude.

Dans le prochain chapitre de notre étude, qui vise à prendre des mesures de géométrie de mesure en particulier "Rhéomètre hybride Discovery (HR 20) TA Instruments", nous allons faire une modélisation technique des géométries de mesure et concevoir des modèles similaires aux géométrie de mesure TA instruments à l'aide de SOLIDWORKS, et les étapes de leur fabrication au niveau de la halle Technologie à l'Université de Biskra.

# **Chapitre III : Proposition d'un nouvel accessoire multifonction pour rhéomètres**

Le présent chapitre présente une idée innovante développée dans le cadre du projet PRFU-A11N01UN070120220002. L'idée est un nouvel accessoire multifonction pour rotative, faciles à installer et à utiliser, composés d'un couvercle anti-évaporation, d'une surface rugueuse et d'un récipient pour mettre l'excédent de matière de l'échantillon. L'invention est préparée et enregistrée, en collaboration avec deux membres du projet cité, sous forme de brevet d'invention (DZ Patent, N° 220446, déposé le 3 juillet 2022). La contribution principale réalisée dans le cadre de ce mémoire consiste à réaliser tous les dessins techniques, de toutes les versions évolutives de l'accessoire, par logiciel SOLIDWORKS.

### **III.1 Résumé de l'idée**

L'invention est un accessoire multifonction trois-en-un pour diminuer la durée des manipulations et d'augmenter la précision de mesures durant une analyse rhéologique, notamment et non exclusivement en utilisant un rhéomètre rotatif avec des géométries de types plan-plan et plan-cône. L'invention permet de minimiser le temps de nettoyage de la géométrie de mesure pour chaque manipe et de minimiser les problèmes d'évaporation de l'échantillon et de glissement durant les mesures rhéologiques. Les figures III.1 et III.2 montrent les Accessoires multifonctionnels et résume comment l'utilisation des accessoires sur un rhéométrie rotative (plaque Peltier) les uns sur les autres dans l'arrangement conformément à la présente invention. Le principe de l'invention est de monter un support de fixation verticale (3) sur le plan Peltier afin d'assurer que les accessoires peuvent être utilisés séparément. Un support amovible pour l'élimination de la matière en plus résulte de l'appui de l'outil de mesure (13) sur l'échantillon par une canalisation d'évacuation (6). Pour minimiser le problème de glissement, une plaque rugueuse (7) peut être fixée sur le support principal (3) mené au moins de languettes faites d'une manière à bloquer le mouvement rotatif ou de vibration de (5). Sur le support 8 est placé un couvercle anti-évaporation 10 avec deux semi-couvercles (11), percé d'un trou central pour l'outil 13., et un éponge humide 9 pour éviter le séchage de l'échantillon.

### **III.2 Domaine technique auquel se rapporte l'invention**

La présente invention se rapporte au domaine technique des essais rhéologiques. L'application de l'invention est notamment, mais non exclusivement, liée au rhéomètre rotative qui fonctionne avec les géométries plan-cône et plan-plan. D'autres applications de l'invention sont également possibles notamment, mais non exclusivement, dans les

domaines industriels et de la recherche scientifique.

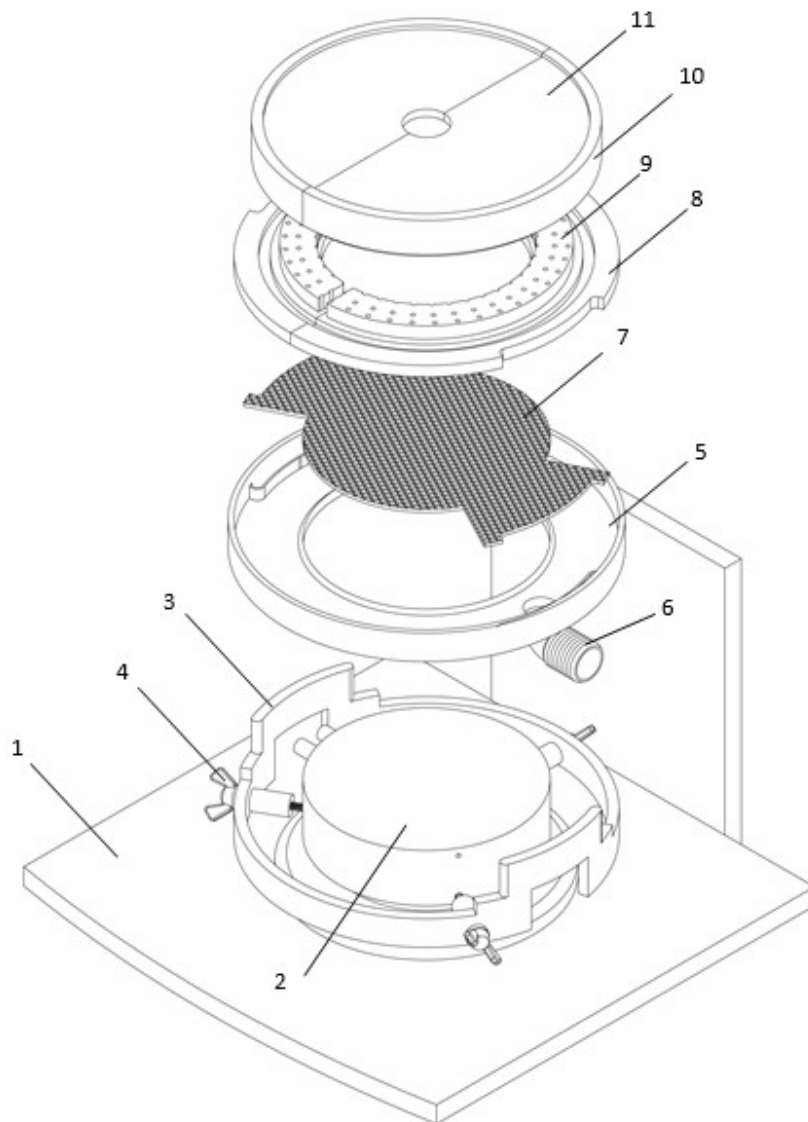


Figure III.1 : Accessoires multifonctionnels d'un rhéométrie rotative. La figure résume comment l'utilisation des accessoires sur un rhéométrie rotative (plaque Peltier) les uns sur les autres dans l'arrangement conformément à la présente invention.

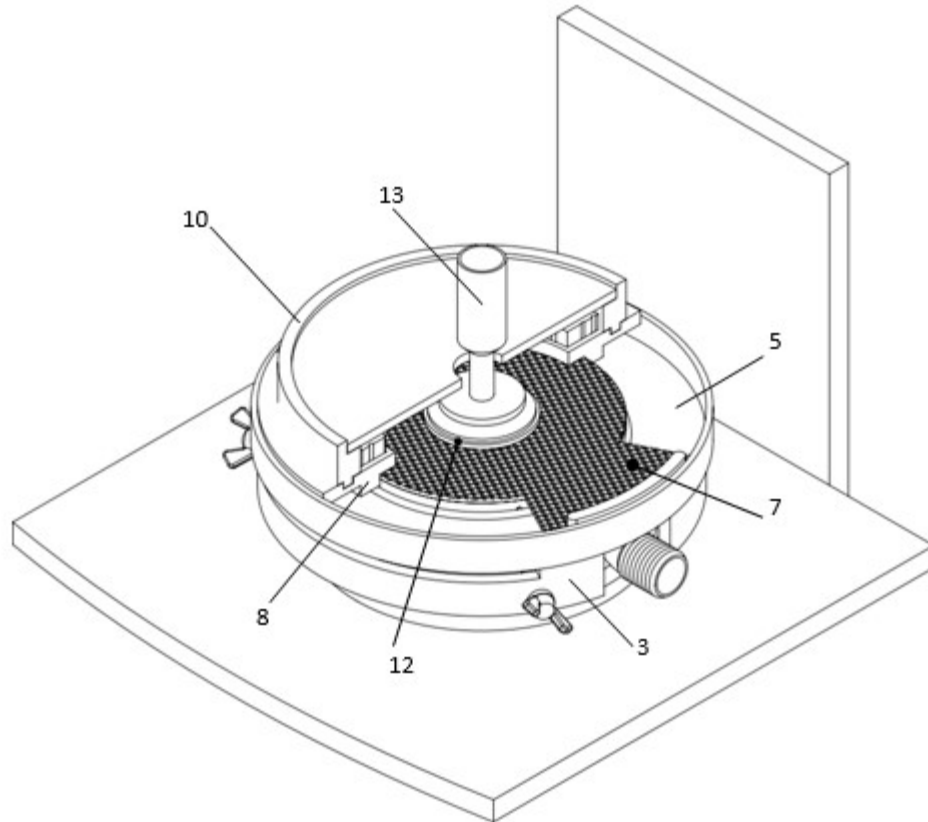


Figure III.2 : La figure 2 est un accessoire multifonctionnel pour un rhéométrie rotative. La figure résume comment installer tous les accessoires multifonctionnels et un échantillon après qu'il a été préparé avec un instrument de mesure et sur un rhéomètre (plaque).

### III.3 Etat de la technique antérieure

La durée et la précision de mesures sont généralement parmi les paramètres les plus importants durant l'évaluation du comportement rhéologique des matériaux complexes. En effet, l'analyse rhéologique par rhéomètre rotatif passe par des tests rhéométriques qui peuvent prendre beaucoup de temps. Ce dernier peut varier d'une analyse à l'autre, de quelques minutes à des jours, en fonction de la nature du matériau, du nombre d'échantillons et des protocoles de mesures. Pour chaque test, notamment pour les géométries de types plan-plan et plan-cône, une partie du temps de l'analyse est consacrée au nettoyage de la géométrie de mesure et de l'excédent de la matière sous la géométrie de mesure et sur les côtés de la plaque. Même les boutons de fonctionnement du rhéomètre peuvent être touchés par l'excédent de l'échantillon; et jusqu'à présent aucune solution technique à ce problème est proposée.

Par ailleurs, le contrôle des problèmes de l'évaporation de l'eau de l'échantillon et de glissement est nécessaire pour avoir des mesures précises sur un rhéomètre rotative c des géométries plan-plan et plan-cône. On parle de problème d'évaporation lorsque l'échantillon est en contact direct avec l'atmosphère. Ce problème peut entraîner une diminution du volume de l'échantillon et une augmentation de la viscosité de l'échantillon, surtout lorsque les essais sont longs. Les techniques pratiques, utilisées pour minimiser ce problème, consistent à travailler sous atmosphère contrôlé par un couvercle anti-évaporation ou en plaçant un film liquide sur les surfaces libres pour les géométries à surface libre horizontale. En générale, les couvercles anti-évaporations sont fournis avec des géométries de mesures spéciales de types plan ou cône; mais qui ne fonctionnent pas avec des géométries ordinaires. D'autres inconvénients, de ce type de couvercles, sont à signaler notamment par rapport à la limitation de la vitesse de cisaillement durant les manipulations. En outre, le phénomène de glissement est le plus couramment rencontré lors de l'étude rhéologique des fluides. Il résulte du cisaillement préférentiel d'une fine couche du matériau testé près des parois solides. Ce phénomène conduit à des erreurs sur les mesures et peut être contrôlé expérimentalement en rendant les parois solides (plaque et/ou géométrie) plus rugueuses pour augmenter les frottements.

### III.4 But de l'invention

L'objectif de l'invention est de proposer un accessoire multifonction trois-en-un pour diminuer la durée des manipulations et d'augmenter la précision de mesures durant une analyse rhéologique. Cette caractérisation vise, notamment mais non exclusivement, l'évaluation du comportement rhéologique des matériaux complexes en utilisant un rhéomètre rotatif avec des géométries de types plan-plan et plan-cône. Ainsi, l'invention présente une solution technique visant à :

i) Minimiser le temps de nettoyage de la géométrie de mesure et de l'excédent de la matière sous la géométrie de mesure et sur les côtés de la plaque ; et éviter que les boutons de fonctionnement du rhéomètre soient touchés par l'excédent de l'échantillon. ii) Effectuer des tests dans un environnement contrôlé et minimisant le problème d'évaporation au cours des manipulations, présentation d'une solution humiliante et de garder les caractéristiques fluidifiées spéciales durant un processus durable. iii) Contrôler le phénomène de glissement durant les mesures rhéologiques, de remédier aux problèmes d'utilisation d'une plaque rugueuse lors d'un processus de tournage en grande vitesse.

### III.5 Présentation de l'essence de l'invention et son mode de réalisation

Les figures 1 et 2 illustrent l'accessoire multifonctionnel de l'invention avec :

Base de support de plaque Peltier 1, plaque Peltier 2, support de l'accessoires 3, vis de fixation support de accessoires sur plaque Peltier 4, canalisation d'évacuation d'eau pour le nettoyage du récipient 6, plaque métallique à surface rugueuse 7, base spéciale éponge humide et support couvercle anti-évaporation 8, éponge humide 9, couvercle anti-évaporation 10, plaque de verre 11, l'échantillon 12, instrument de mesure 13.

Afin de clarifier les objectifs, les solutions techniques et les avantages de l'invention actuelle, les solutions techniques de l'invention actuelle seront décrites en détail ci-dessous. Il est clair que les modèles décrits ne sont qu'une partie des incarnations actuelles de l'invention en référence aux dessins 1 et 2, les dessins d'accompagnement montrent des accessoires multifonctionnels pour un rhéométrie rotative, constitués de 4 parties principales.

La première partie se compose de 3 supports de accessoires et 4 vis dont la fonction est de supporter les trois autres accessoires principaux et bloqué la rotation en fixant un 3 support de accessoires sur la plaque Peltier 2 par trois vis 4 répartis autour de la Plaque Peltier 2.

La deuxième partie est un récipient de nettoyage 5 mené d'une canalisation d'évacuation d'eau 6 consiste à stocker la matière en plus qui résulte de la phase d'essuyage sur les côtés de l'outil de mesure ; cette partie facilite le processus de nettoyage et de trimer des côtés de l'extra matière, avec une solution d'un espace de déchet. Par deux trous au niveau des côtés du récipient de nettoyage 5 est monté sur un support 3, à travers la canalisation d'évacuation d'eau 6 se fait le lavage du récipient 5, nous pouvons relier à une autre conduite d'eau ou un récipient plus grand à côté du rhéomètre rotative à travers la canalisation d'évacuation 6 avec une plus longue installation d'évacuation, le récipient de nettoyage 5 peuvent être démontés de la plaque Peltier 2 et nettoyé récipient de nettoyage 5 loin du rhéomètre rotative sans utiliser la canalisation d'évacuation d'eau 6 par sa fermeture en bouchon.

La troisième partie est constituée d'une plaque métallique à surface rugueuse 7, le rôle de cette usage est de minimiser le phénomène de glissement de l'échantillon par une surface

grossière, particulièrement à grand vitesses de rotation de l'instrument de mesure 13, et protégeons la plaque lisses (plaque Peltier 2), qui peuvent être endommagés par des particules grossières comme le (ciment), par l'utilisation d'une plaque métallique à surface rugueuse 7 sur plaque Peltier 2. Des languettes sur les côtés de la surface rugueuse 7 assurent l'installation sur le bord du support de l'accessoire 3 et de bloquer sa propre rotation.

La quatrième partie constituée de la base 8, et de l'éponge humide 9, et du couvercle anti-évaporation 10 et de la plaque de verre 11, la base 8 est pourvue d'une cavité spéciale pour placement de l'éponge humide 9, et d'une rainure pour le couvercle anti-évaporation 10, ce dernier est un demi-cercle creux à l'intérieur en plastique et 11 plaque de verre supérieure de forme semi-circulaire démontables avec a un trou au centre, pour l'instrument de mesure, et l'éponge humide 9 sa forme sur un arc semi-circulaire, assemblage ces pièces en forme circulaire. Cette partie a pour objectif de réaliser des tests rhéologiques dans un environnement saturé de vapeur d'eau (l'environnement est humide), et réduire le contact de l'échantillon avec l'air ambiant par un système semi-fermé (système semi-fermé), réduire ainsi l'évaporation de l'eau de l'échantillon pour des mesures plus exactes et des interprétations de résultats plus justes. En particulier sans effet de limiter la vitesse de rotation de l'instrument de mesure par contrairement aux du couvercles anti-évaporation classiques qui limitent la vitesse de rotation, ce qui signifie à faire un test à grande vitesse et d'augmenter son intervalle du test, ceci est fait en immergeant la partie inférieure de l'éponge humide 9 dans la creux du la base 8 pour s'assurer qu'elle est humide, en versant de l'eau et en gardant l'eau au centre de creux, la position de la plaque de verre 11 sur la partie supérieure admet la contrôle de test rhéologie sans ouvrir le couvercle anti évaporation 10, Pour garder l'humidité au milieu de test, alors on met la base 8 avec un éponge humide 9 immergé au milieu de sa creux en sur la plaque Peltier 2 ou en sur la plaque métallique à surface rugueuse 7, En cas de besoin de la plaque métallique à surface rugueuse 7, et couvrir l'éponge humide 9 avec le couvercle anti-évaporation 10. Ces pièces sont centrées autour de l'instrument de mesure 13 et échantillon 12 après la préparation, nous pouvons encore mouiller une éponge humide 9 après l'installation, en cas de besoin.

### III.6 Revendications

1. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig. 1 et 2) perfectionné principalement pour : 1) réserver l'humidité naturelle des substances, dans



- un système semi-fermé, et 2), améliorer la performance des tests rhéologique par une rapidité de la préparation de l'échantillon en facilitant la tâche de nettoyage, et 3) placement d'une plaque rugueuse assurant l'adhésion de la matière sans glissement.
2. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon la revendication précédente, les trois systèmes peuvent utiliser en permettant un couplage des trois sous-systèmes à la fois ou une utilisation unique (d'une manière indépendante) d'où la première partie peut être installée avec les trois autres parties indépendamment les uns des autres.
  3. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, la première partie (support d'accessoire 3) peut être installée avec la deuxième partie (récipient de nettoyage 5) sans l'installation des autres parties.
  4. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, la première partie (support de accessoires 3) peut être installée avec la troisième partie (plaque métallique à surface rugueuse 7) sans l'installation des autres parties.
  5. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, la première partie (support d'accessoires 3) peut être installée avec la quatrième partie (couvercle anti-évaporation 10) sans l'installation des autres parties.
  6. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, les quatre sous système peuvent être installées ensemble sans qu'elles affectent leur propre performance et celui du test.
  7. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, la plaque métallique à surface rugueuse 7 peut être utilisée sous différentes formes ou fabriquée par diverse matériaux pour satisfaire à des besoins spécifiques.
  8. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, couvercle anti-évaporation 10 peut être fabriqué avec la plaque de verre 11 par un seul matériau.
  9. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon

les revendications précédentes, peut être placé par différents systèmes de fixation et/ou différentes modes de support ou renforcé (support de accessoires 3) par des boulons basés sur (base de support de plaque Peltier 1) autour (plaque Peltier 2).

10. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, le support d'accessoire 3 peuvent être fabriqués à partir de différente matériaux.
11. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, la plaque métallique à surface rugueuse 7 peut être renforcé par des vis fixées sur deux côtés la plaque métallique à surface rugueuse 7 et support de accessoires 3 en cas d'effet de vibration.
12. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, permette l'usage unique ou par changement de l'éponge humide 9 par des matériaux qui emmagasine de l'eau, comme du coton, du tissu ou de l'eau et/ou d'autre liquide.
13. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, la fabrication du (récipient de nettoyage 5) sans (canalisation d'évacuation d'eau pour nettoyer le récipient 6) ou la fermée par un bouchon.
14. L'accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs (fig.1 et 2), selon les revendications précédentes, les sous-systèmes sont devisé à des parties en demi-cercle ou quart de cercle selon les besoins de la superficie (récipient de nettoyage 5), facilite le processus de montage et de démontage (fermeture et d'ouverture pour le couvercle), dans le but d'asperger d'eau ou de nettoyer.

# **Chapitre IV : Conception et réalisation de géométries de mesure pour rhéomètre à contrainte imposée**

## IV.1 Introduction

Ce chapitre présente la phase de notre étude, qui est destiné à la conception les différentes la géométrie de mesure et un axe en utilisant le logiciel SOLIDWORKS, nous avons présenté les étapes de fabrication de ces différentes géométries de mesure. Ce projet a été réalisé au niveau du HALL TECHNOLOGIE à l'Université de Biskra.

## IV.2 Prendre les mesures de la pièce

Nous avons pris la géométrie de mesure en utilisant le Pied à coulisse (voir la figure iv.1), dans le Center de Recherche – CRAPC Biskra.



Figure IV.1: Pied à coulisse

Nous avons mesuré une géométrie de mesure plan-plan géométrie de mesure de diamètre Ø40 mm voir la (Figure IV.2) et l'axe de fixation.



Figure IV.2 : Géométrie de mesure plan plan de diamètre Ø40 mm de TA instruments.

### **IV.3. Réalisation**

La réalisation est partagée en deux Partie essentielles :

1. Partie conception des pièces.
2. Partie fabrication des pièces.

#### **IV.3.1. Partie Conception**

Après avoir pris de mesures de géométrie de mesure plan-plan et de l'axe, Avant la phase de fabrication, nous avons conçu ces pièces par Ordinateur (CAO) à l'aide du logiciel SOLIDWORKS et le dessin technique et gamme d'usinage des pièces.

##### **IV.3.1.1. Définition de la CAO**

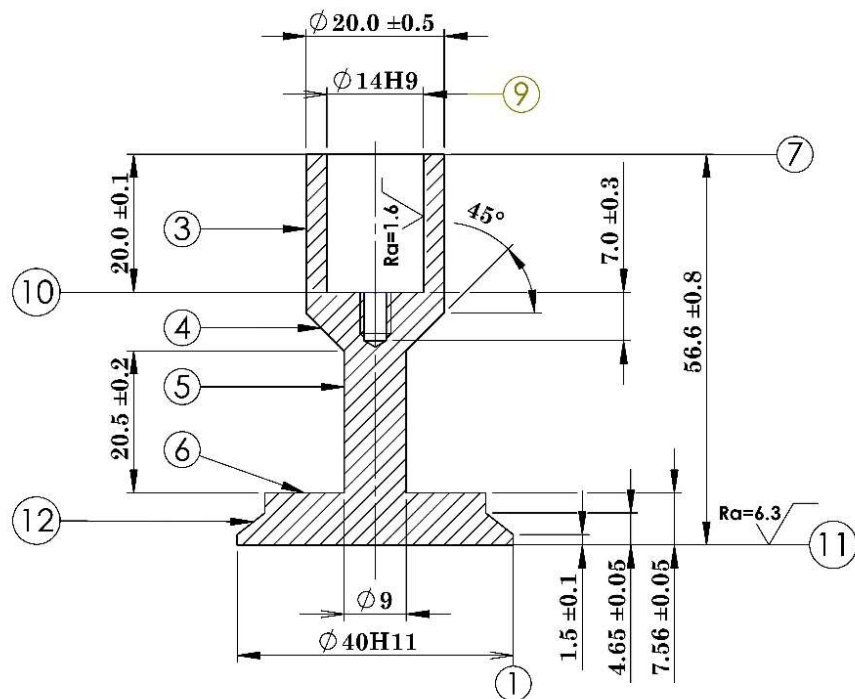
La Conception Assistée par Ordinateur (CAO), c'est une technique dans laquelle l'homme et l'ordinateur sont rassemblés pour résoudre des problèmes techniques dans une équipe qui associe étroitement [39].

##### **IV.3.1.2. Définition du SOLIDWORKS**

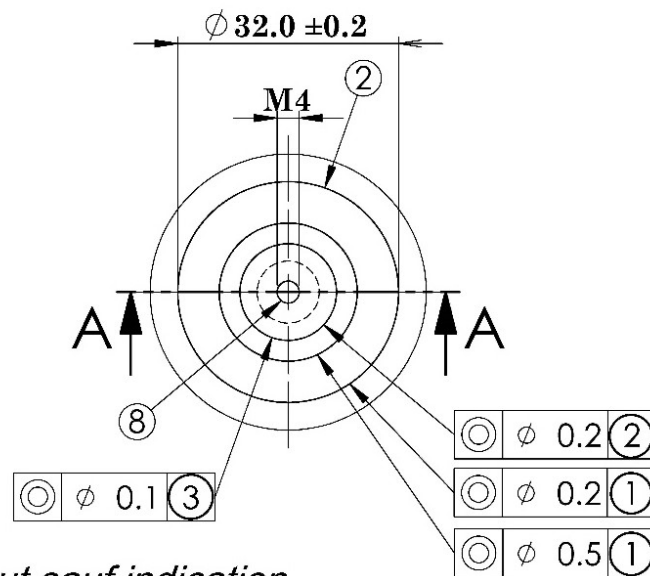
SOLIDWORKS est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows [40].

##### **IV.3.1.3 Dessin technique de la pièce par logiciel SOLIDWORKS**

Dessin technique des pièces par logiciel SOLIDWORKS publiées dans l'annexe



### Coupe A-A



*Ra = 3.2 partout sauf indication*

Figure IV.3 : Dessin de technique géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm

IV.3.1.4 Gamme d'usinage de la géométrie de mesure plan-plan

FEUILLE D'ANALYSE DE FABRICATION							
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER DE BISKRA			Ahmed Merdoukh Ahmed		Elément : géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm		
N°	Phases			Matière : Aluminium	Nombre : (1)		
	M.O	N°	N°	Opérations	Croquis	Outils	Contrôle
100	S.M	110	111	<p><b>Contrôle de la brute</b></p> <p>D= 40 mm L=88 mm</p>		Scie alternative	Pied à coulisse
200	T.P.	210	211	<p><b>Tournage</b></p> <p><b>Dressage :</b> (7) Cm1= 88 mm</p>		Outil à Dresser	Pied à coulisse
			212	<p><b>Chariotage :</b> (2), (12')</p> <p>Cm2=34.65 mm Cm3= Ø16 mm</p>		Outil à Charioter	Pied à coulisse
			213	<p><b>Chariotage :</b> (1), (6)</p> <p>Cm4 =37.56 mm Cm5= Ø10 mm</p>		Outil à Charioter	Pied à coulisse

200	T. P	210	214	<p><b>Gorgeage:</b>                      (4'), (5), (6)  <math>Cm7=37.56</math> mm  <math>Cm8= \varnothing 4.5</math> mm  <math>Co1= 20.54</math> mm</p>		Outil à Gorgor pelle	Pied à coulisse
			215	<p><b>Chanfreinage :</b>                      (12)  <math>Cm9=37.56</math> mm  <math>Co2= 4 \times 45^\circ</math> mm</p>		Outil à Chanfreiner	Pied à coulisse
				<p><b>Chanfreinage:</b>                      (4)  <math>Cm10=58.1</math> mm  <math>Co3= 5.5 \times 45^\circ</math> mm</p>			
			216	<p><b>Perçage :</b>                      (9')  <math>Cm11=58.6</math> mm  <math>Cm12=28</math> mm  <math>Co4= \varnothing 3.4</math> mm</p>		Outil à Perçage	Pied à coulisse
217	<p><b>Perçage :</b>                      (9)  <math>Cm13=66.6</math> mm  <math>Cm14=20</math> mm  <math>Co5= \varnothing 14</math> mm</p> <p><b>Taroudage :</b>                      Surface (8)  <math>\varnothing M4</math></p>		Outil à Perçage	Pied à coulisse			



200	T. P	210	218	<p><b><u>Dressage et alésage :</u></b>                  (9)  <math>Cm_{13}=66.6</math> mm  <math>Cm_{14}=20</math> mm  <math>Co_6=\text{Ø}14</math> mm</p>		Outil à aléser et dresser	Pied à coulisse
		<b><u>2ème serrage</u></b>					
		220	221	<p><b><u>Dressage :</u></b>                  (11)  <math>Cm_{15}=56.6</math> mm</p>		Outil à Dresser	Pied à coulisse

### IV.3.2. Partie Fabrication

Après avoir effectué les ajustements structurels nécessaires à notre géométrie de mesure plan-plan, nous sommes passés à la fabrication de pièces au niveau du hall technologique de l'Université de Biskra, et avons commencé à mettre les pièces en coupe, tournage, où on a passé ces pièces par chaque opération a la machine concernée qui la réalise.

#### IV.3.2.1. Les machines utiliser pour fabrication

##### IV.3.2.1.1. Scie alternative

Pour couper l'ébauche d'acier de défèrent pièces à fabriquer.



Figure IV.4 : Scie alternative

##### IV.3.2.1.2. Toure

Pour dressage et chariotage des géométrie de mesure et l'axe de fixation.



Figure IV.5 : Le toure

### IV.3.2.2. Les photos des pièces à fabriquer



Figure IV.7 : l'axe de fixation avec tété



Figure IV.6 : Géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm en acier



Figure IV.8 : Géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm en aluminium

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la conception les différentes la géométrie de mesure et un axe et les étapes de fabrication, nous sommes arrivés que nous possibilité modifier la géométrie de mesure à l'exception des surfaces qui obligation être le même à la géométrie de mesure TA instruments.

Dans le prochain chapitre de notre étude, qui vise à prendre tester la géométrie de mesure que Nos fabricants au niveau du HALL TECHNOLOGIE à l'Université de Biskra, par rapport la géométrie de mesure de TA instruments, et présenter les composants du rhéomètre et comment préparer l'échantillon et Le protocole utilisé dans les tests rhéologiques.

# **Chapitre V : Tests expérimentaux et validation des pièces fabriquées**

## V.1 Introduction

Ce chapitre présente la dernière étape de notre étude, Détails de la mise en fonctionnement du rhéomètre disponible au niveau du Center de Recherche – CRAPC Biskra, qui est destiné à comment utiliser le rhéomètre hybride Discovery (HR 20) pour l'étude rhéologique, en présenter les composants du rhéomètre et comment préparer l'échantillon et Le protocole utilisé dans les tests rhéologiques que nous avons fait sur la confiture d'abricot, pour tester la géométrie de mesure que Nos fabricants au niveau universitaire par rapport la géométrie de mesure de TA instruments, par comparant les résultats obtenus par les tests expérimentaux.

## V.2 Description et Installation de Le rhéomètre hybride Discovery

### V.2.1. Les compose de Le rhéomètre hybride Discovery (HR 20)

#### V.2.1.1. Les compose d'espace travail

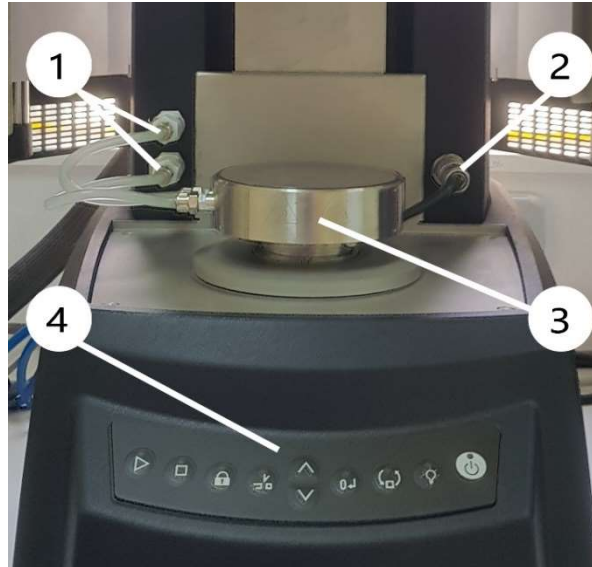


Figure V.1 : Les compose d'espace travail de Le rhéomètre hybride Discovery (HR 20)

- 
1. Tuyaux du liquide de refroidissement et chauffage

---

  2. Câble d'data

---

  3. La plaque Peltier

---

  4. Clavier de Fonctionnement de rhéomètre

---

#### V.2.1.2Appareil de circulateur

L'appareil de circulateur (Figure V.2) pour rotation liquide dans le riomètre pour un travail correct et efficace des régulateurs de température sur plaque Peltier.



Figure V.2 : Appareil de circulateur

### V.2.1.3 Fonctionnement du clavier

La manipulation du clavier est assurée à l'aide de dix touches situées en bas de l'écran. Leurs fonctions sont détaillées sur la (Figure V.3).



Figure V.3 : les boutons du clavier

Tableau V.1 expliquant Fonctionnement les boutons du clavier de rhéomètre hybride Discovery (HR 20)

Tableau V.1: les boutons du clavier

1.	Démarrage l'opération
2.	Arrête l'opération
3.	Désactiver et activer le fonctionnement du clavier
4.	Afin d'éliminer l'excès de matière de l'échantillon
5.	Déplacement de l'instrument de mesure vers le haut
6.	Déplacement de l'instrument de mesure vers le bas
7.	Réglage le repère zéro du Rhéomètre
8.	Découvrez l'instrument de mesure avec le code à barres.
9.	On / off l'éclairage
10.	On / off le rhéométrie

### V.2.2. Procédure de mise en marche

Le rhéomètre hybride Discovery (HR 20) 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.



### V.2.2.1. Préparation du Rhéomètre avant démarrage de l'utilisation

- |   |   |
|---|---|
| 1 | Démarrage du compresseur Jusqu'à la pression 2 bar.   |
| 2 | Vérifier les niveaux de liquide en appareil de circulateur et ajouter un additif antifongique régulièrement.  |
| 3 | Assurez-vous que la porte du four est bien ouverte.   |
| 4 | Installation de la plaque peltier dans rhéométrie et installation de tuyaux du liquide de refroidissement, chauffage et installation du câble d'data. |

### V.2.2.2. Démarrage du Rhéomètre

- |   |  |
|---|--|
| 1 | Allumer le rhéomètre et démarrage du rhéomètre et l'ordinateur à connecteur  |
| 2 | Monte de l'axe et calibrer l'axe de fixation par ordinateur  |
| 3 | Monte de géométrie de mesure et défini de géométrie de mesure par ordinateur   |
| 4 | Calibrer de géométrie de mesure et réglage le repère zéro par ordinateur ou sur clavier de rhéomètre   |
| 5 | Régler la température à qui nous voulons pour faire le test, laisser le rhéomètre en marche pendant au moins 10 minutes avant le démarrage du test |

### V.2.3. Mise en place de l'échantillon

L'échantillon utilisé dans le test est confiture d'abricot -Amor Benamor, comme le montre la (Figure V.4).



Figure V.4 : confiture d'abricot Amor Benamor

**Étape 1 :**

Positionner géométrie de mesure en position afin de laisser de la distance entre (45 mm) pour de mettre l'échantillon de test, mettre l'échantillon au centre de la plaque Peltier directement sous la géométrie de mesure à l'aide d'une spatule non métallique, comme le montre la (Figure V.5).



Figure V.5 : Étape 1

**Étape 2 :**

Descendre la géométrie de mesure sur l'échantillon à une distance entre la géométrie de mesure et la plaque Peltier (1 mm), comme le montre la (Figure V.6).

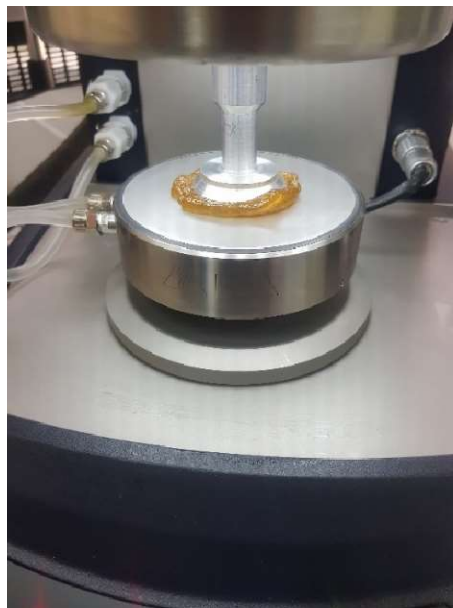


Figure V.6 : Étape 2

**Étape 3 :**

Couper l'échantillon en excès à partir du bord avec une spatule et attendre 5 minutes ou plus pour permettre à l'échantillon de se réchauffer, comme le montre la (Figure V.7).



Figure V.7 : Étape 3

**V.3. Protocole de mesure**

Le protocole expérimental est divisé en trois phases, les Phases premier et deuxième, consiste à appliquer à l'échantillon (plateau – plateau)  $\dot{\gamma}$  imposée, suivi la troisième phase consiste à appliquer à l'échantillon (rampe de montée)  $\tau$  imposée, en température maintenue constante à 20°C.

**Phase 1 :**

Un plateau de vitesse de cisaillement constante de 10s<sup>-1</sup>, pendant 10 secondes.

**Phase 2 :**

Un plateau de vitesse de cisaillement constante de 150s<sup>-1</sup>, pendant 600 secondes (10 min), voir la (Figure V.8).

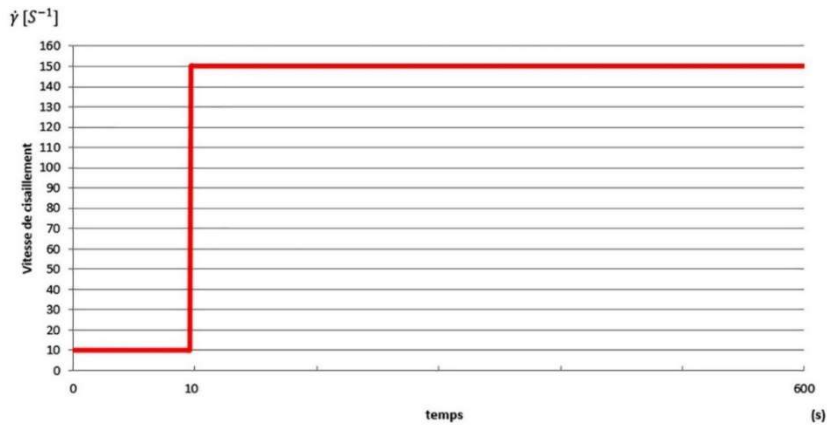


Figure V.8 : le protocole de mesure pour les Phases premier et deuxième mis en place (plateau - plateau)  $\dot{\gamma}$  imposée

### **Phase 3 :**

Une rampe de contrainte montante d'un pas de 0.088Pa/s, pendant 1800 secondes (30 min) voir la (Figure V.9).

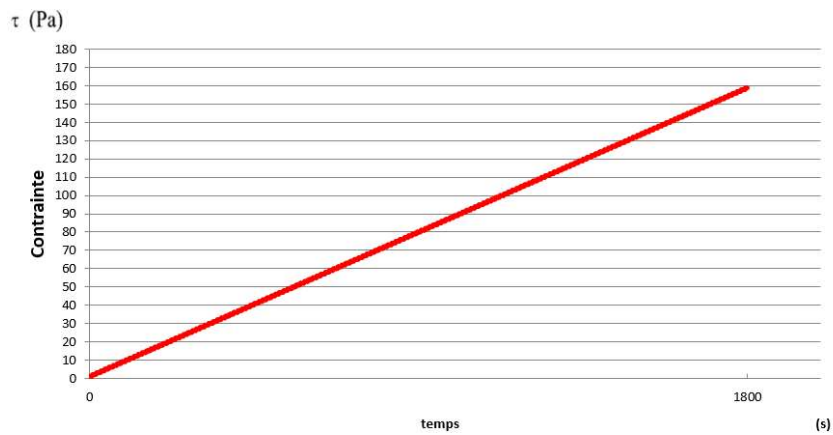


Figure V.9 : le protocole de mesure pour la troisième phase mis en place (rampe de montée)  $\tau$  imposée

## V.4. Tests expérimentaux de la géométrie de mesure plan-plan fabrique

### V.4.1. La géométrie de mesure plan-plan en utilisant

Dans des tests expérimentaux, nous avons effectué quatre les tests rhéologiques sur confiture d'abricot en utilisant trois géométrie de mesure présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau V.2 : Les géométries de mesure utilisées

<p>1) Géométrie de mesure plan plan de diamètre Ø40 mm en acier.</p>	
<p>2) Géométrie de mesure plan plane diamètre Ø40 mm en aluminium.</p>	
<p>3) Géométrie de mesure plan plane diamètre Ø40 mm de TA instruments.</p>	

## V.4.2. Validation

**Pour validation on a fait troie validation.**

### V.4.2.1 Définition du moment d'inertie

Le moment d'inertie, désigné par  $I$ , mesure la mesure dans laquelle un objet résiste à l'accélération rotationnelle autour d'un axe particulier, et est l'analogue rotationnel à la masse (qui détermine la résistance d'un objet à l'accélération linéaire).

Il dépend de la valeur et de la répartition des masses au sein du système et a pour dimension  $M \cdot L^2$  (produit d'une masse par le carré d'une longueur) [41].

Unités SI kg m<sup>2</sup>

Dimension  $M \cdot L^2$

Symbole usuel  $I, J, \Delta$

Lien à d'autres grandeurs

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \quad (V-1)$$

### V.4.2.3 Première validation

Pour deuxième validation ont calculé le moment d'inertie à en utilisant du

Rhéomètre hybride Discovery (HR 20) et par logiciel SOLIDWORKS Comme représentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, pour validation la qualité des géométries de mesure de fabriquées

: Moment d'inertie des géométries de mesure utilisées

Tableau V.3 : Moment d'inertie des géométries de mesure utilisées

	TA instruments	locale Acier	locale aluminium
Moment d'inertie par Rhéomètre	8.5831 $\mu\text{N.m. s}^2$	12.2599 $\mu\text{N.m. s}^2$	5.3186 $\mu\text{N.m. s}^2$
Moment d'inertie par SOLIDWORKS	8.8850 $\mu\text{N.m. s}^2$	11.9064 $\mu\text{N.m. s}^2$	5.373.1 $\mu\text{N.m. s}^2$

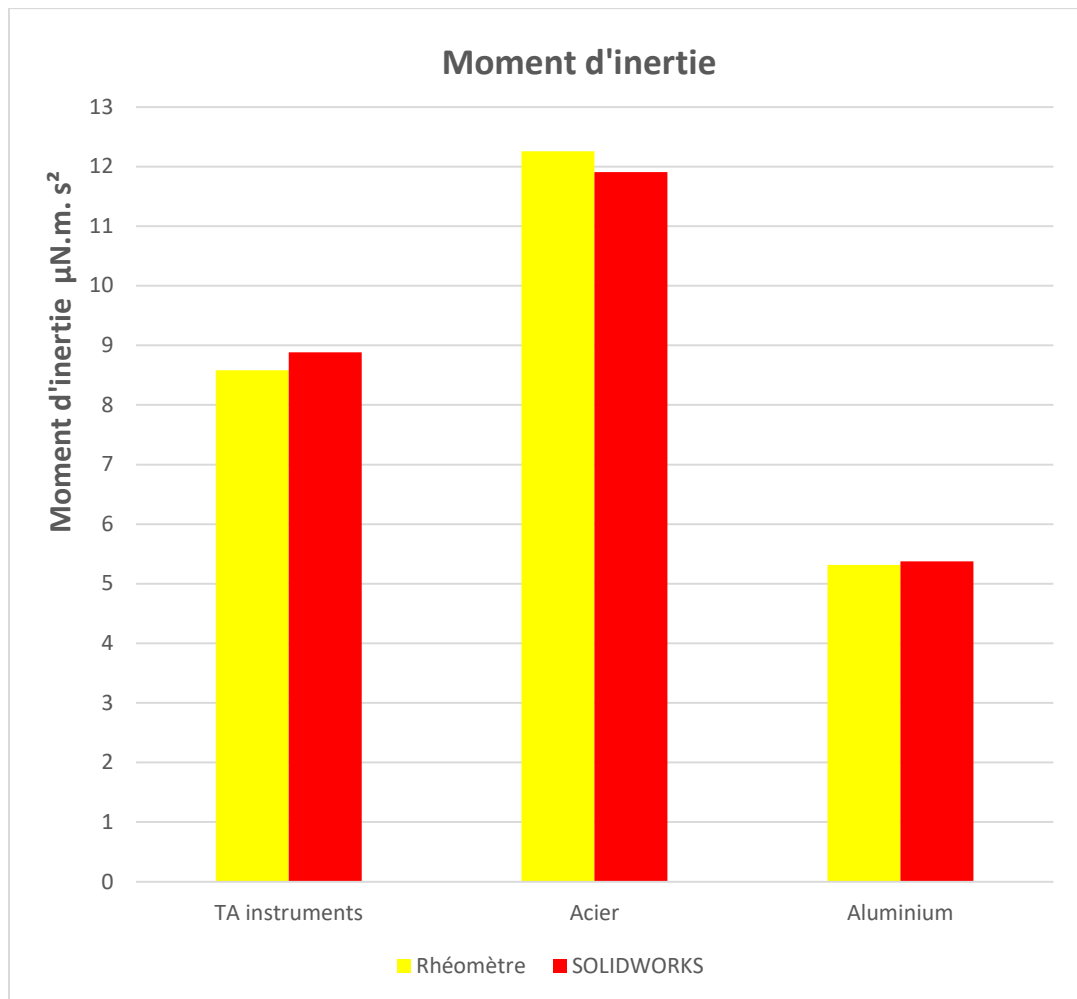


Figure V.10 : différence entre le moment d'inertie par le Rhéomètre et SOLIDWORKS

#### V.4.2.3 Deuxième validation

Pour deuxième validation on a fait quatre tests d'écoulement de confiture d'abricot en utilisant trois géométries de mesure.

1. Géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\text{Ø}40$  mm en acier utilisé pour quatrième test.
2. Géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\text{Ø}40$  mm en aluminium utilisé pour troisième test
3. Géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\text{Ø}40$  mm de TA instruments utilisé pour premier et deuxième test.

##### V.4.2.3.1 Comparaison des résultats des tests

Lorsque nous comparons les courbes d'écoulement avec le premier et le deuxième testé, représentées sur la (Erreur ! Source du renvoi introuvable.), On voit qu'il y a de la zone d'erreur admissible, parce que la confiture d'abricot des fluides thixotropes.

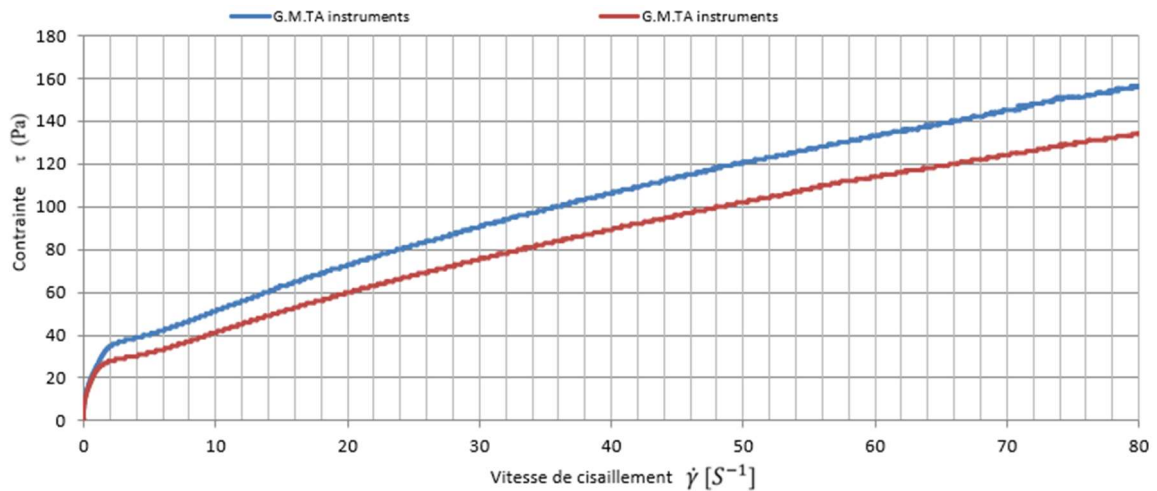


Figure V.11 : courbe d'écoulement du premier et la deuxième testée en utilisant confiture d'abricot.

Lorsque nous comparons les Courbes d'écoulement de quatre testés, représentées sur la (Figure V.12), nous remarquons que la courbe d'écoulement obtenue à partir du troisième testé avec la géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\varnothing 40$  mm en acier, en comparant les courbes d'écoulement obtenues à partir de premier et deuxième testé avec la géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\varnothing 40$  mm de TA instruments. Ils sont très proches l'une de l'autre et meilleurs par rapport à la courbe d'écoulement obtenue à partir du quatrième testé avec la géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\varnothing 40$  mm en aluminium, mais des résultats généralement acceptables parce que la confiture d'abricot des fluides thixotropes.

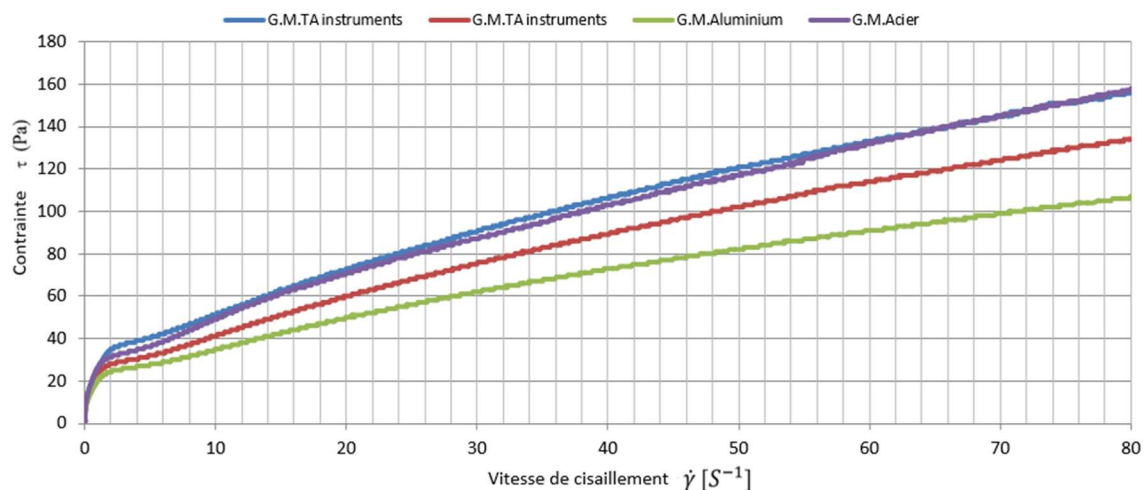


Figure V.12 : courbe d'écoulement de quatre testés.

Si nous comparons les courbes de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement de quatre testés, représentées sur la (Figure V.15), nous constatons que les résultats sont très proches et acceptables pour un fluide thixotrope.



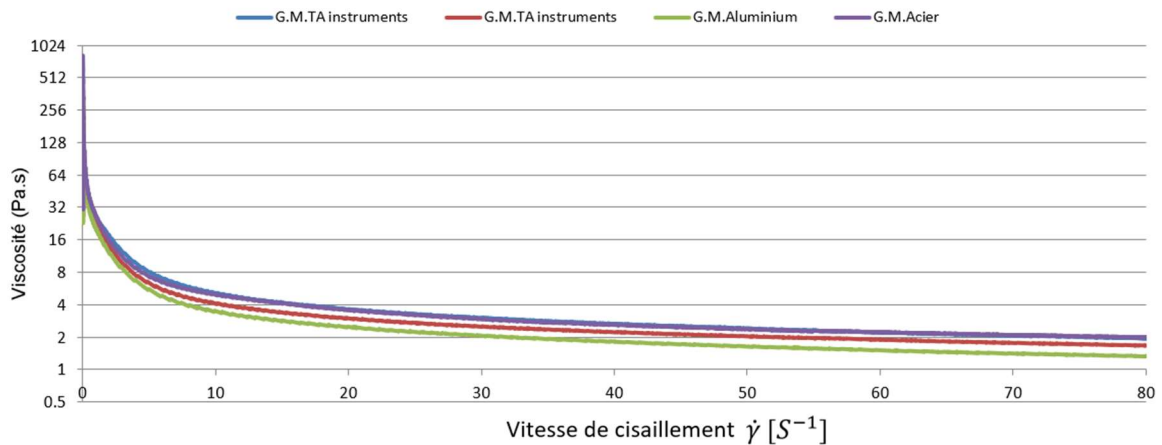


Figure V.13 : les courbes de de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement de quatre testés.

#### V.4.2.4 Troisième validation

Pour troisième validation on a fait deux tests d'écoulement de graisse industrielle voir la (Figure V.14), en utilisant deux géométries de mesure.



Figure V.14 : une graisse industrielle [42].

##### V.4.2.4.1 Comparaison des résultats des tests

Lorsque nous comparons les courbes d'écoulement de graisse industrielle de deux testés, représentées sur la (Figure V.14), nous remarquons que la courbe d'écoulement obtenue à partir du deuxième testé avec la géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\varnothing 40$  mm en acier, en comparant les courbes d'écoulement obtenues à partir de premier testé avec la géométrie de mesure plan plan de diamètre  $\varnothing 40$  mm de TA instruments. Ils sont très proches l'une de l'autre, mais des résultats généralement acceptables.

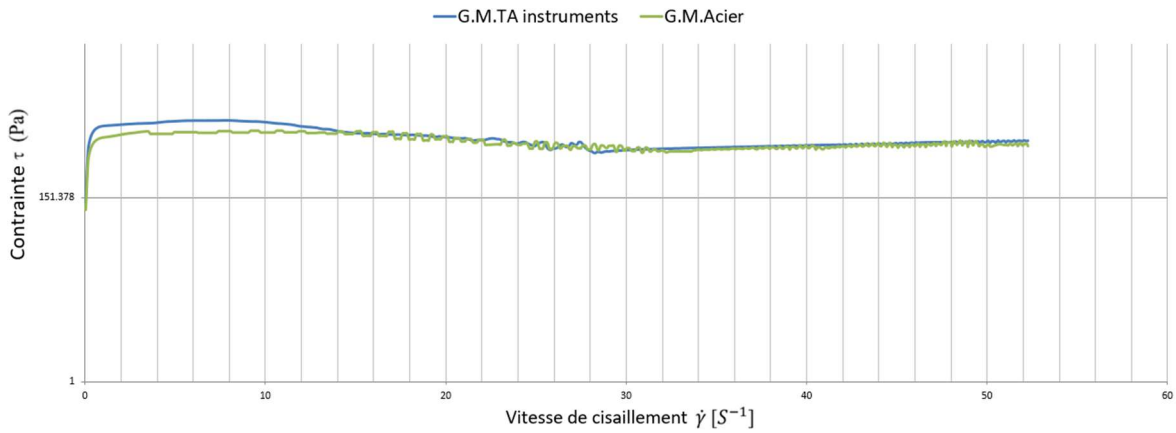


Figure V.15 : Courbe d'écoulement du premier et de la deuxième testée en utilisant graisse industrielle.

Si nous comparons comparons les courbes de de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement graisse industrielle de deux testés, représentées sur la (Figure V.16), nous constatons que les résultats sont très proches et acceptables, et c'est conclusion que nous pouvons adoption sur l'outil de mesure que nous avons fabriqué dans les tests de rhéologie.

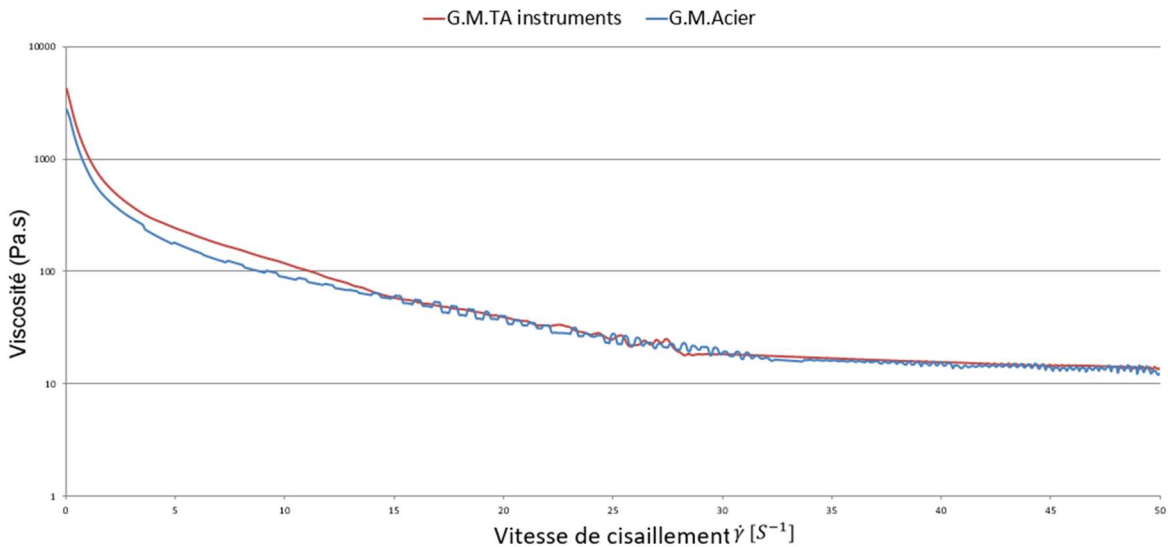


Figure V.16 : les courbes de de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement graisse industrielle de deux testés.

## IV.5. Résultats et discussions

Nous avons d'abord fabriqué la géométrie de mesure plan-plan de diamètre  $\text{Ø}40$  mm en acier, nous avons expérimenté l'instrument de mesure sur le Rhéomètre hybride Discovery (HR 20), nous avons constaté que nous pouvions changer les dimensions de la géométrie de mesure plan-plan à l'exception des surfaces (1,9,10,11) représentées sur la (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), Parce que le rhéomètre réinitialise le moment d'inertie et le repère zéro par rapport la géométrie de mesure plan-plan que nous avons fabriquée.

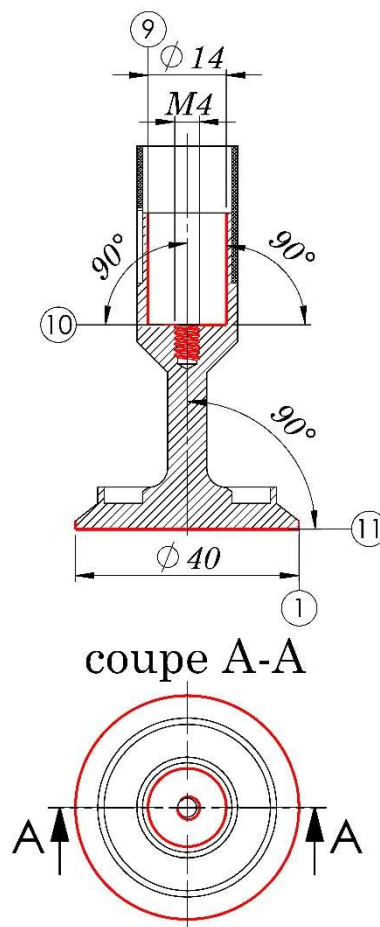


Figure V.17 : Surfaces ne peuvent pas être modifiés.

Nous avons donc essayé de changement dimensionnel de géométrie de mesure plan-plan de diamètre  $\text{Ø}40$  mm en aluminium pour résister au choc

## V.6.Conclusion

Nous avons expliqué dans ce chapitre comment utiliser le rhéomètre hybride Discovery (HR 20) pour l'étude rhéologique, le protocole utilisé dans les tests rhéologiques, et nous avons testé la géométrie de mesure que Nos fabricants au niveau universitaire par rapport à la géométrie de mesure TA instruments.

Du point de vue rhéologique, nous concluons que la géométrie de mesure fabriqué peut être utilisé dans les études rhéologiques et nous pouvons fabriquer d'autres types de géométrie de mesure et différentes tailles pour le rhéomètre hybride Discovery (HR 20).

# Conclusion générale

Le contexte de cette d'étude présente de nombreux défis pour le constructeur qui doit trouver sa place dans l'organisation de projet de construction. La tâche principale de l'ingénieur, autrement dit c'est une opportunité de tester des idées pratiques et de chercher solutions des directement sur le terrain afin de résoudre un problème de recherche, de fabrication, de mise en forme, quel que soit le problème un ingénieur doit avoir l'esprit créative pour proposer des solutions utiles.

Le but de ce travail est de se familiariser avec le domaine de la rhéologie à travers de l'étude de :

i) la possibilité de concevoir, réaliser et valider localement des géométries de mesures pour le rhéomètre à contrainte imposée ; et ii) de contribuer à la proposition d'un nouvel accessoire pour ces rhéomètres.

Le mémoire présente les détails de la conception et de l'usinage des géométries de mesure, pour rhéomètre à contrainte imposée, réalisées localement. Des tests rhéologiques de validation expérimentale ont été effectués sur la confiture d'abricot (Amor Ben Amor) et une graisse industrielle. Pour cela, on a utilisé des outils originaux et d'autres fabriqués au niveau de l'université en Aluminium et en Acier. Les résultats obtenus sont satisfaisants ce qui montrent que l'étude ouvre des perspectives pour la rhéologie, ainsi que la fabrication d'accessoires et d'instruments de mesure dans divers domaines.

D'autre part, on a pu contribuer à la rédaction et à l'enregistrement d'un brevet d'invention en collaborant avec des membres du projet PRFU- A11N01UN070120220002 (DZ Patent, N° 220446, déposé le 3 juillet 2022). La contribution est détaillée dans le mémoire proposant un nouvel accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs simplifiant le nettoyage du plan pour chaque manipulation et permettant le contrôle des problèmes de glissement et d'évaporation de l'eau durant la mesure.

# Références

1. Irgens, F., *Rheology and non-newtonian fluids*. Vol. 190. 2014: Springer.
2. Rheology, J.o. *The Minutes of the Meeting of the Society of Rheology*. in *SOR*. December 19--20, 1929. Wardman-Park Hotel, Washington: J. Rheol. 1.
3. Ferguson, J. and Z. Kemplowski, *Applied fluid rheology*. Vol. 16. 1991: Springer.
4. Couarraze, G. and J. Grossiord, *Initiation à la rhéologie, 3è éd.* Editions TEC & DOC, Paris, France, 2000.
5. Lefebvre, J., *Rhéologie et alimentation. Les concepts, les méthodes et les applications de la rhéologie dans le domaine alimentaire*. *Revue Française de Diététique*, 1988. **3**(126): p. 3-15.
6. Benchabane, A., *Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères: Effets de l'ajout de polymères*. 2006, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008).
7. Day, M.A., *The no-slip condition of fluid dynamics*. *Erkenntnis*, 1990. **33**(3): p. 285-296.
8. Mezger, T., *The rheology handbook*, in *The rheology handbook*. 2020, Vincentz Network.
9. Pries, A.R. and T.W. Secomb, *Blood flow in microvascular networks*, in *Microcirculation*. 2008, Elsevier. p. 3-36.
10. Barnes, H.A., *A handbook of elementary rheology*. Vol. 1. 2000: University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics Aberystwyth.
11. Elahacene, N.e.h., *Essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel rheo3000*. 2019.
12. Benslimane, A., *Rhéologie et écoulement de fluides chargés: application aux réseaux d'assainissement urbains: étude expérimentale et modélisation*. 2012, Université de Strasbourg.
13. Chhabra, R.P. and J.F. Richardson, *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. 2011: Butterworth-Heinemann.
14. Barnes, H.A., J.F. Hutton, and K. Walters, *An introduction to rheology*. Vol. 3. 1989: Elsevier.
15. Ostwald, W., *About the rate function of the viscosity of dispersed systems*. *Kolloid Z*, 1925. **36**: p. 99-117.
16. Bird, R.B., et al., *Dynamics of polymeric liquids, volume 2: Kinetic theory*. 1987: Wiley.
17. Cross, M.M., *Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems*. *Journal of colloid science*, 1965. **20**(5): p. 417-437.
18. Bingham, E.C., *Fluidity and plasticity*. Vol. 2. 1922: McGraw-Hill.
19. Herschel, W.H. and R. Bulkley, *Konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen*. *Kolloid-Zeitschrift*, 1926. **39**(4): p. 291-300.
20. Roberts, G., H. Barnes, and P. Carew, *Modelling the flow behaviour of very shear-thinning liquids*. *Chemical Engineering Science*, 2001. **56**(19): p. 5617-5623.
21. Mendes, P.R.S. and E.S. Dutra, *Viscosity function for yield-stress liquids*. *Applied Rheology*, 2004. **14**(6): p. 296-302.
22. Benchabane, A. and K. Bekkour. *Un nouveau modèle rhéologique pour les fluides à seuil. in Application à des mélanges argile-polymère. 40ème Colloque annuel du GFR. Nice*. 2005.
23. 3219-1, I., *Rhéologie Partie 1: Vocabulaire et symboles pour la rhéométrie rotative et*

- oscillatoire*. 2021.
24. Mezger, T.G., *The Rheology Handbook For users of rotational and oscillatory rheometers 4th edition*. 2014.
  25. Barnes, H.A., *A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1995. **56**(3): p. 221-251.
  26. Bonifas, J.-L., *Contribution a l'etude de la viscosite des suspensions de bentonites*. 1998, Strasbourg 1.
  27. El Kissi, N., S. Nigen, and F. Pignon, *Glissement et rhéométrie*. Rhéologie, 2006. **10**: p. 13-39.
  28. Azouz, K.B., *Relation entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersions de particules d'argile dans des dispersions de polymères*. 2010, Université de Haute Alsace-Mulhouse.
  29. Leyama, M., *Etude de l'écoulement des suspensions de bentonite*. 2001, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008).
  30. Doraiswamy, D., *The origins of rheology: a short historical excursion*. Rheology Bulletin, 2002. **71**(1): p. 1-9.
  31. Walters, K., *Rheometry*. 1975: Chapman & Hall.
  32. Macosko, C.W., *Rheology principles. Measurements and Applications*, 1994.
  33. 3219-2, I., *Rhéologie Partie 2: Principes généraux de la rhéométrie rotative et oscillatoire*. 2021.
  34. tainstruments, *Rheology Theory and Applications*. 2020.
  35. Schramm, G., *A practical approach to rheology and rheometry*. 1994: Haake Karlsruhe.
  36. Margules, M., *Über die Bestimmung des Reibungs-und Gleitungscoëfficienten aus ebenen Bewegungen einer Flüssigkeit*. 1881: Aus der kk Hof-und Staatsdruckerei in Wien.
  37. Instruments, T. *HR 20 Rhéomètre hybride Discovery (DHR)*. 2022-04-20; Available from: <https://www.tainstruments.com/hr-20/?lang=fr>.
  38. Instruments, T. *Les spécifications du Rhéomètre hybride Discovery (DHR) HR20*. 2022-04-20; Available from: <https://www.tainstruments.com/hr-20/?lang=fr>.
  39. Flichy, P., *Internet ou la communauté scientifique idéale*. Réseaux. Communication-Technologie-Société, 1999. **17**(97): p. 77-120.
  40. *Définition du SOLIDWORKS*. 2022-05-08; Available from: <https://fr.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.
  41. wikipedia. *Moment d'inertie*. 2022-05-27; Available from: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moment\\_d%27inertie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moment_d%27inertie).
  42. Condat, *Graisse industrielle*. 2022-05-27.
  43. A. Ahmed-Merdoukh, A. Ghazali, A. Benchabane, M.C. Nebbar, S. Hameurlain, "Accessoire multifonction trois-en-un pour les rhéomètres rotatifs simplifiant le nettoyage du plan pour chaque manipulation et permettant le contrôle des problèmes de glissement et d'évaporation de l'échantillon durant la mesure", DZ Patent, App. 220446 (déposé le 3 juillet 2022).

# **Annexe : Dessin technique des pièces usinées**



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

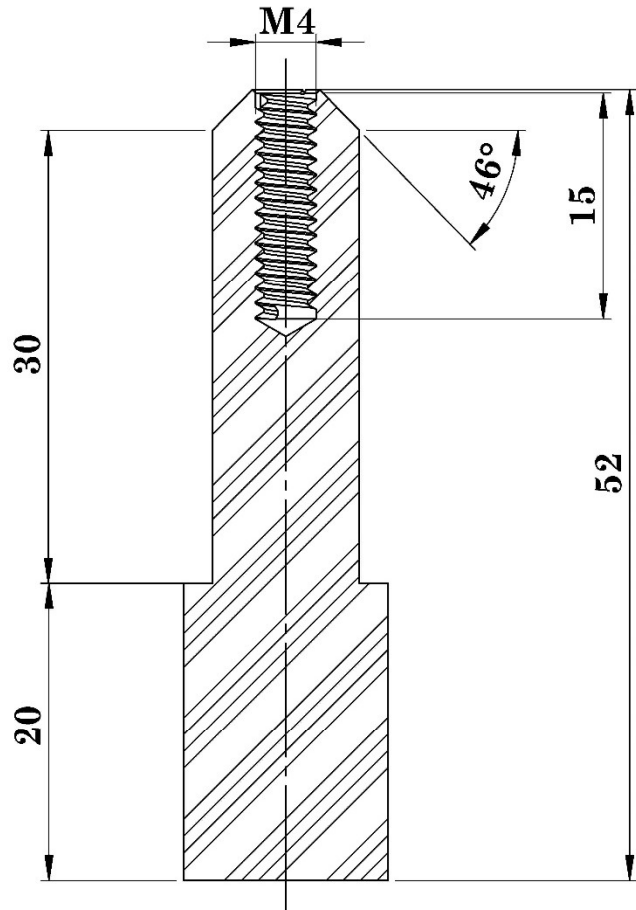
C

B

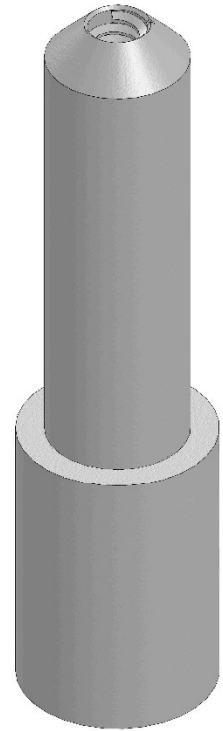
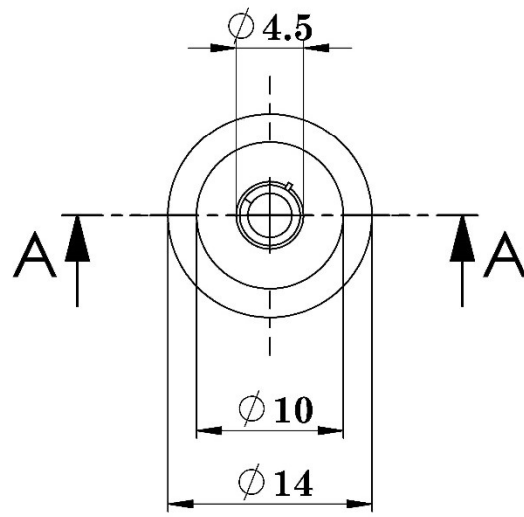
B

A

A



**Coupe A-A**



ECHALLE:2:1

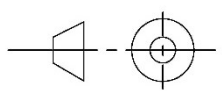
Université Mohamed Khider Biskra

Ahmed

Format : A4

**Tête d'axe**

Ahmed Merdoukh



2022 - 05 - 06

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

285

15

24

E

E

M4

∅ 4

M4

D

D

C

C

B

B

ECHALLE:1:2

Université Mohamed Khider Biskra

Ahmed

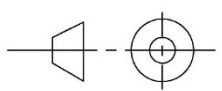
A

A

Format : A4

L'axe

Ahmed Merdoukh



2022 - 05 - 06

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

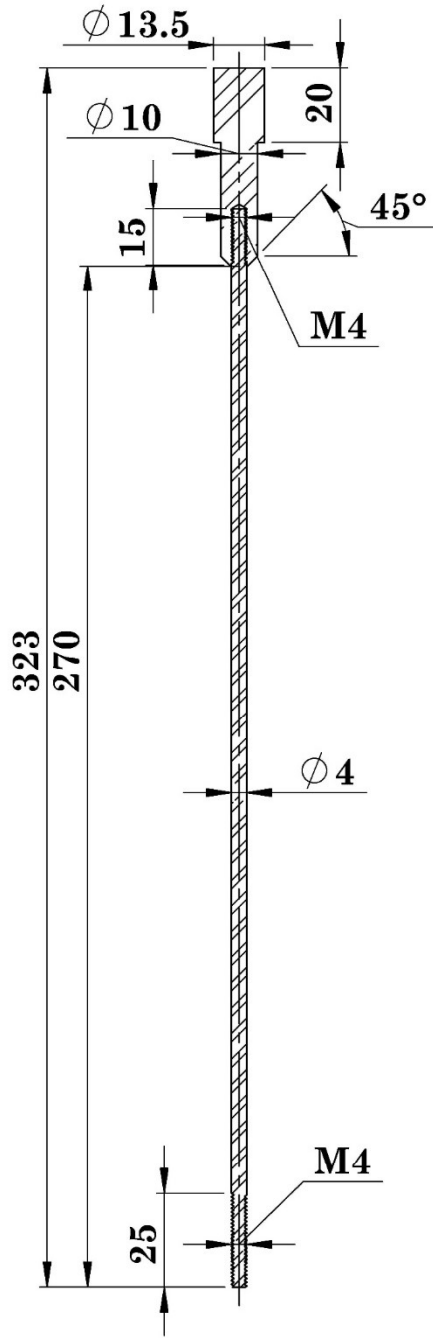
C

B

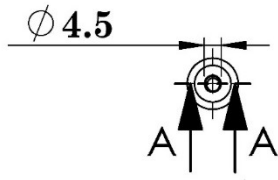
B

A

A



**Coupe A-A**



ECHALLE:1:2

Université Mohamed Khider Biskra

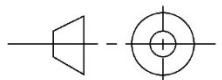
Ahmed

Format : A4

Ahmed Merdoukh

l'axe avec tété

2022 - 05 - 06

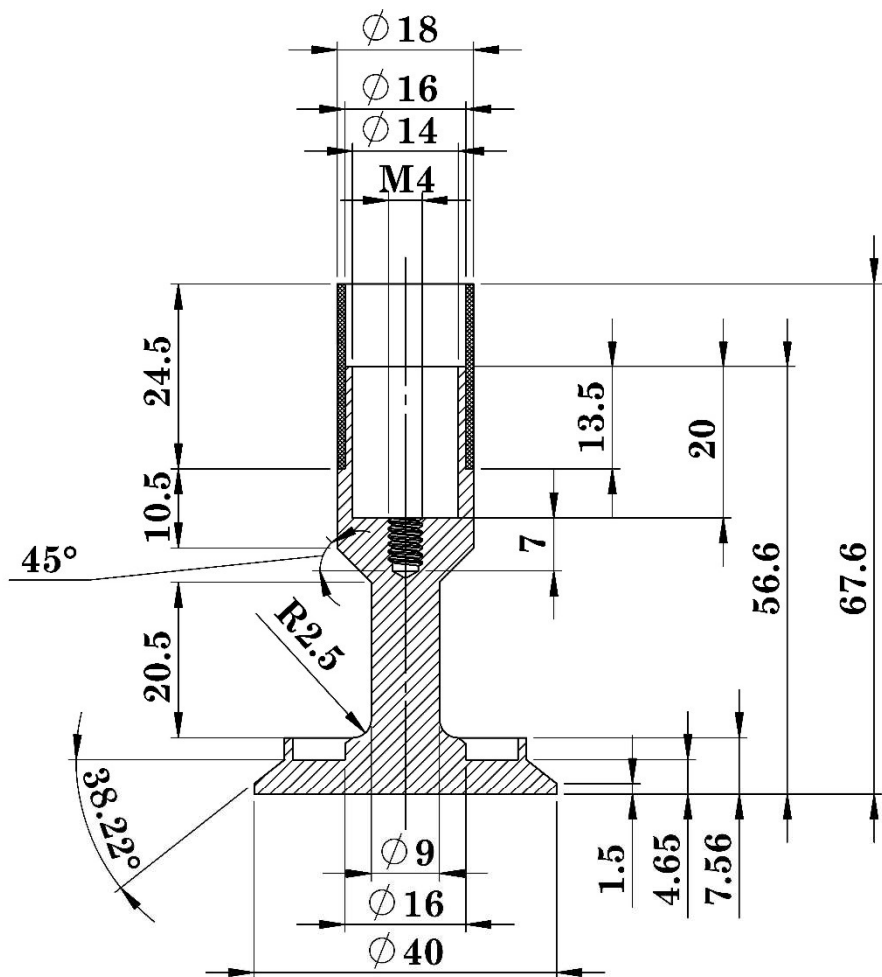


4

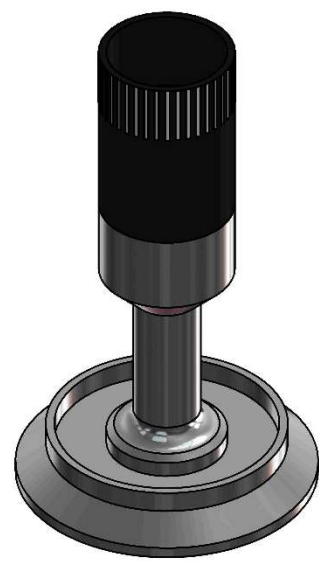
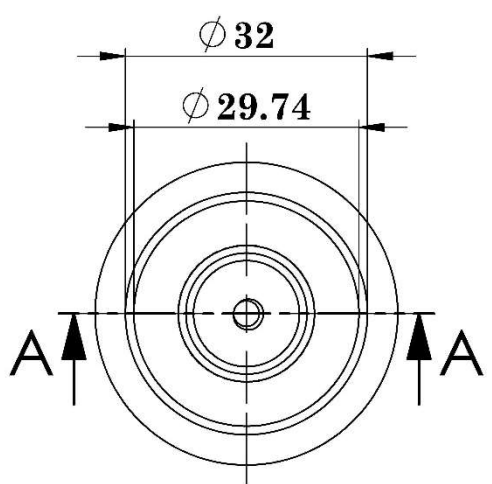
3

2

1



**Coupe A-A**



ECHALLE:1:1

Université Mohamed Khider Biskra

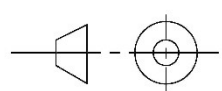
Ahmed

Format : A4

Ahmed Merdoukh

Géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm de TA instruments

2022 - 05 - 06



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

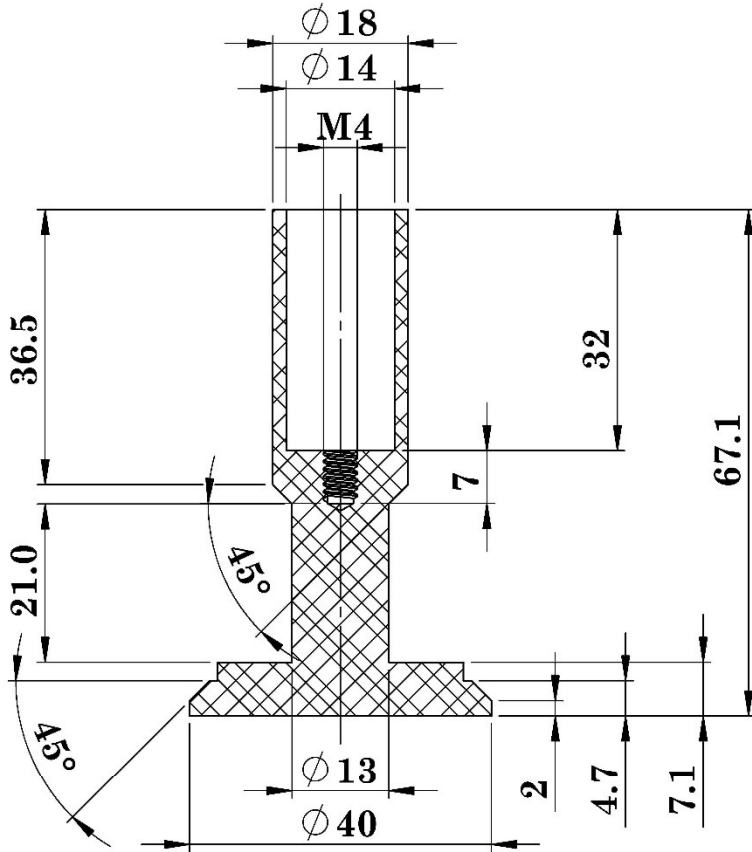
C

B

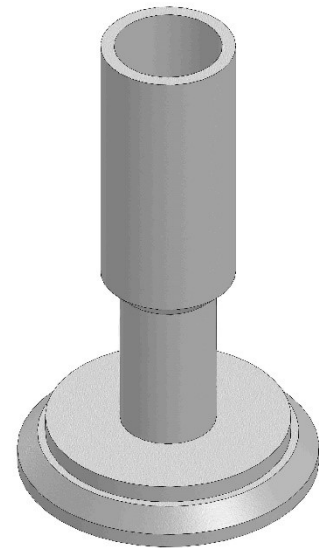
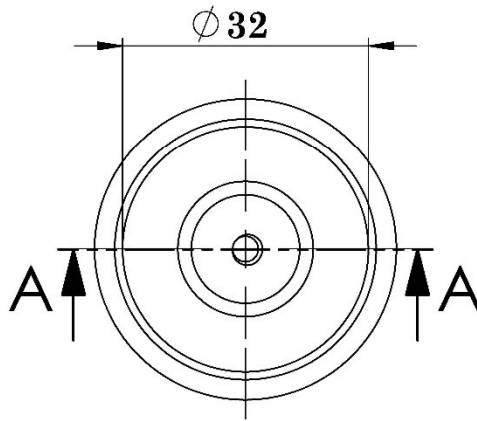
B

A

A



### Coupe A-A



ECHALLE:1:1

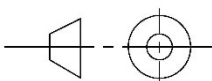
Université Mohamed Khider Biskra

Ahmed

Format : A4

Géométrie de mesure plan-plan  
de diamètre Ø40 mm en acier

Ahmed Merdoukh



2022 - 05 - 06

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

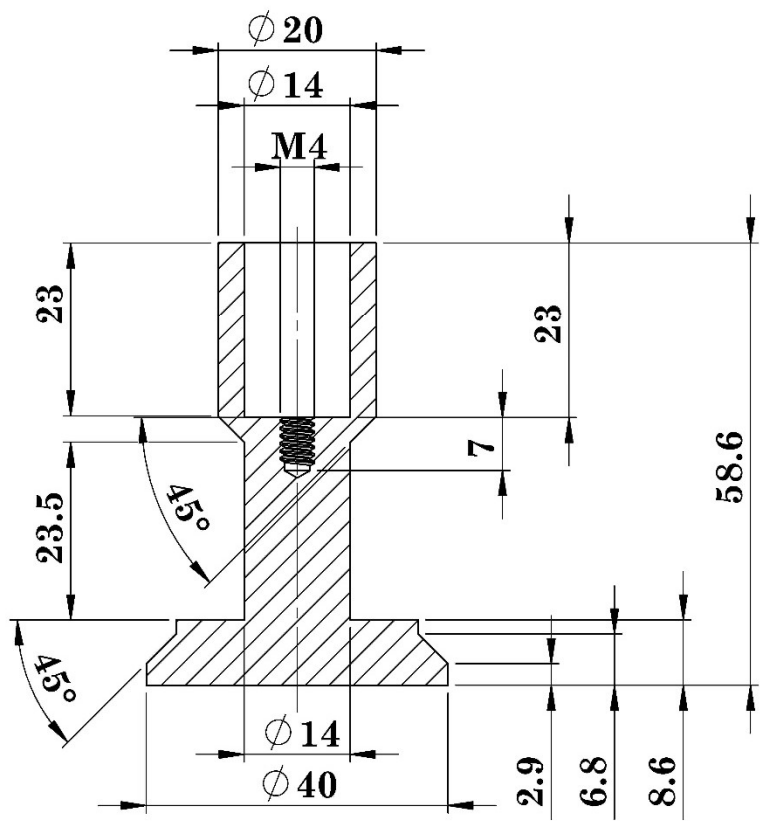
C

B

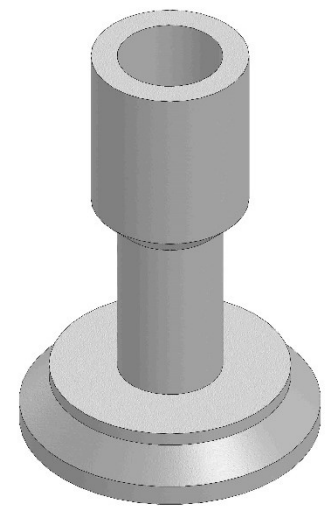
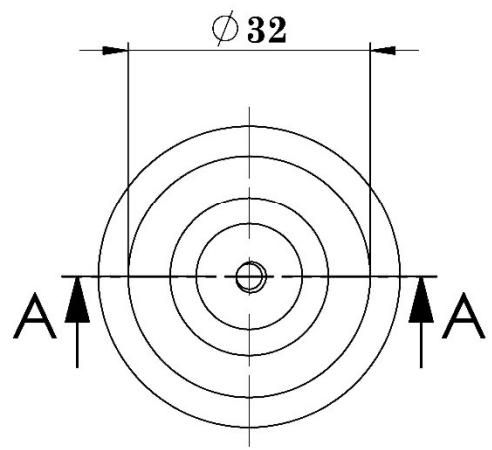
B

A

A



### Coupe A-A



ECHALLE:1:1

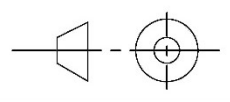
Université Mohamed Khider Biskra

Ahmed

Format : A4

Géométrie de mesure plan-plan de diamètre Ø40 mm en Aluminium

Ahmed Merdoukh



2022 - 05 - 06

4

3

2

1