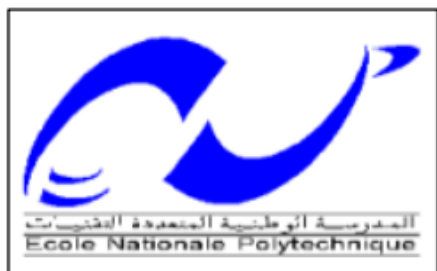


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie chimique

Etude rhéologique de quelques produits alimentaires

Ahmed SABAA & Housseyn MAROUF

Sous la direction de : Mr T. AHMED ZAID PROFESSEUR(ENP)

Mme S. HADDOUM MCB(ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2018)

Composition du jury:

Président	Mr. A. SELATNIA	Pr (ENP)
Promoteurs	Mr T. AHMED ZAID	Pr (ENP)
	Mme S. HADDOUM	MCB (ENP)
Examinatrices	Mme. S. SAHI	MCB (ENP)
	Mme. S. TOUAZI	MCB (ENP)

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie chimique

Etude rhéologique de quelques produits alimentaires

Ahmed SABAA & Housseyn MAROUF

Sous la direction de : Mr T. AHMED ZAID PROFESSEUR(ENP)

Mme S. HADDOUM MCB(ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (19/06/2018)

Composition du jury:

Président	Mr. A. SELATNIA	Pr (ENP)
Promoteurs	Mr T. AHMED ZAID	Pr (ENP)
	Mme S. HADDOUM	MCB (ENP)
Examinatrices	Mme. S. SAHI	MCB (ENP)
	Mme. S. TOUAZI	MCB (ENP)

” الله الحمد من قبل ومن بعد ”

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu notre créateur Allah, Grand et Miséricordieux, le tout Puissant de nous avoir donné courage et santé pour achever ce travail.

A cet effet, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements Monsieur T. AHMED ZAID et Madame S. HADDOUM pour leurs encouragements, leurs conseils, leur disponibilité et surtout pour leur patience dans l'encadrement de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent ensuite aux membres du jury. Nous remercions vivement Mr. SELATNIA, professeur au département de génie chimique à L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence de jury.

Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury, Mme. TOUAZI, et Mme. SAHI, Maîtres de Conférences au département de génie chimique à l'école nationale polytechnique d'Alger pour leurs contributions à l'évaluation et l'enrichissement du présent travail.

Nous remercions profondément tous les enseignants qui nous ont encouragés et soutenus pendant nos cursus.

Nous remercions du fond du cœur, nos familles qui nous ont soutenu, encouragés et motivés tout au long de ce travail.

Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidé à la réalisation de ce modeste mémoire.

*Enfin merci au lecteur qui lit ce mémoire.
En vous souhaitant une bonne lecture...*

*Je dédie ce mémoire
A mes chers parents ma mère et mon père
Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur
Encouragement
A mes sœurs
A mes frères
Pour leur affectation et leur soutien moral*

*A toute ma famille
A tous mes amis
Sans oublier mon binôme SABAA AHMED
A tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin
Avec la réalisation du présent mémoire.*

*En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et
chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.*

Avec toute ma tendresse.

HOUSSEYN MAROUF

Aux deux êtres qui me sont les plus chères, ma mère et mon père. Que Allah les garde toujours auprès de moi.

A mes très chers frères

A mes tantes et oncles

A mes cousins et cousines.

A tous mes camarades de l'ENR.

A tous mes amis

A mon cher binôme Housseyn

Ahmed Sabaa

ملخص:

هذا العمل عبارة عن مدخل في علم المواد الغذائية المائعة. انصب فيه اهتمامنا على دراسة البنيات والخصائص الريولوجية للمواد المدروسة، كون هاتين الأخيرتين يلعبان دورا هاما في تقييم المواد من طرف المستهلك من جانب، ومن جانب آخر على المستوى الصناعي حيث تلعب الدور الأكبر في انتاج مواد ذات جودة عالية ومتجانسة تلبى المعايير المطلوبة.

الكلمات الدالة:

مواد غذائية مائعة، ريولوجيا، بنية، ياغورت، مايونيز.

Abstract

This work is a brief foray into the field of semi-liquid food products. Particular attention is given to the structure and rheological properties of these products, two important characteristics for the consumer's assessment of the products, but also at the industry level, which must provide products of uniform quality and consistent with precise specifications.

Keywords: Semi-liquid food, rheology, structure, yogurt, Mayonnaise.

Résumé :

Ce travail est une brève incursion dans le domaine des produits alimentaires semi-liquides. Une attention particulière est accordée à la structure et aux propriétés rhéologiques de ces produits, deux caractéristiques importantes pour l'appréciation des produits par le consommateur mais aussi à l'échelle de l'industrie qui doit fournir des produits de qualité homogène répondant à un cahier des charges précis.

Mots clés : Produits alimentaires semi-liquides, rhéologie, structure, yaourt, mayonnaise.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des sigles	
Liste des abréviations	
Introduction générale	14
Chapitre 1 : Généralité sur les produits alimentaires	
1.1 Introduction	17
1.2 Texture des aliments	17
1.3 Propriétés de texture de différents types d'aliments	18
1.3.1 Propriétés texturales des aliments solides	18
1.3.2 Texture d'aliments solides mous	19
1.3.3 Texture d'aliments fluides	20
1.4 Les émulsions et la rhéologie	21
1.5 La stabilité des émulsions	24
1.6 Facteurs affectant la stabilité de l'émulsion	25
1.7 Rhéologie de la mayonnaise et du yaourt	26
1.7.1 Mayonnaise	26
1.7.2 Yaourt	27
Chapitre 2 : comportement Rhéologique	
2.1 Notions de base	31
2.1.1 Contrainte de cisaillement (Shear stress)	32
2.1.2 Déformation de cisaillement (shear strain)	32
2.1.3 La vitesse de cisaillement	32
2.1.4 La viscosité	33
2.2 Le comportement rhéologique des fluides	34
2.2.1 Les fluides newtoniens	35
2.2.2 Les fluides non newtoniens	36

2.3	Comportement rhéologique des fluides réels	41
2.4	Modèles permettant la description des écoulements	41
2.4.1	Fluide à comportement indépendant du temps	42
2.4.2	Fluide à comportement dépendant du temps	46
Chapitre 3 : Partie expérimental		
3.1	Introduction	49
3.2	Etude du comportement rhéologique	49
3.2.1	Caractérisation du comportement rhéologique d'une substance	50
3.2.2	Présentation des produits	50
3.2.3	Présentation de l'appareil utilisé	51
3.2.4	Principe de fonctionnement d'un rhéomètre rotatif	52
3.2.5	Protocole expérimental	54
3.3	Les résultats expérimentaux	56
3.3.1	Le yaourt	56
3.3.2	La mayonnaise	60
3.4	L'étude de la structure de la mayonnaise	63
3.4.1	Présentation du programme IS capture	64
3.4.2	Description de la caméra	65
3.4.3	Description du microscope	65
3.4.4	Procédure et démarche suivie	66
3.4.5	Analyse des résultats obtenus	67
Conclusion générale		72
Bibliographie		73
Annexe 1 : modèles de courbes d'écoulement		78
Annexe 2 : Caractéristiques des différents mobiles du rhéomètre utilisé		80
Annexe 3 : les différents composants d'un viscosimètre BROOKFIELD		82

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1.1	Une courbe force déplacement typique de l'aliment solide	19
Figure 1.2	Une représentation schématique des trois différents types de courbes force- déplacement pour les aliments solides mous	20
Figure 1.3	Diagramme schématique d'émulsions simples - émulsion huile-dans-eau (H / E) et émulsion eau-huile (E / H)	22
Figure 1.4	Représentation schématique 2D de la structure positionnelle des gouttelettes trouvées dans les émulsions mono-dispersés en fonction de la fraction volumique de la phase dispersée (ϕ). Φ_g représente la fraction volumique du verre de transition de la sphère dure et ϕ_{rcp} représente le fractionnement du volume de l'emballage proche au hasard	23
Figure 1.5	Caractère rhéofluidifiant et thixotrope du yaourt brassé. Evolution de la viscosité apparente d'un échantillon de yaourt brassé soumis à différentes vitesses de cisaillement	29
Figure 2.1	Vitesse d'écoulement d'un fluide en utilisant le modèle à deux plaques pour les essais de cisaillement	31
Figure 2.2	Écoulement laminaire sous la forme de couches de fluide	33
Figure 2.3	Modèle de Newton pour la définition de la viscosité	33
Figure 2.4	Diagramme de cisaillement de base du taux de cisaillement et de la contrainte de cisaillement pour la classification du comportement d'écoulement indépendant du temps des aliments fluides : newtonien (Newto), rhéofluidifiant (SN) et rhéoépaississant (S-T). Certains aliments ont une limite d'élasticité qui doit être dépassée pour que l'écoulement se produise : Bingham et Herschel-Bulkley (H-B)	35
Figure 2.5	Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéofluidifiant	36
Figure 2.6	Données expérimentales typiques montrant un comportement thixotropique dans une suspension de boues rouges	39
Figure 2.7	Phénomène de recul dans les fluides visqueux et viscoélastiques	40
Figure 2.8	Courbes de fluage et de recul pour les matériaux élastiques, visqueux et viscoélastiques	41
Figure 2.9	Courbes de relaxation pour les matériaux élastiques, visqueux et viscoélastiques	42

Figure 2.10	Diagramme d'applicabilité des modèles rhéologiques couramment utilisés aux types de comportement d'écoulement	43
Figure 2.11	Rhéogramme réel d'un fluide rhéofluidifiants	43
Figure 2.12	Représentation graphique (viscosité contre la vitesse de cisaillement) du modèle Cross avec différentes valeurs de α	45
Figure 3.1	Rhéomètre BROOKFIELD LV-I+ utilisé	52
Figure.3.2	Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'un rhéomètre rotatif	53
Figure 3.3	Variation de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement du yaourt.	58
Figure 3.4	Rhéogramme d'un échantillon de yaourt brassé.	59
Figure 3.5	Estimation du modèle d'écoulement du yaourt brassé	59
Figure 3.6	Variation de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement du yaourt	61
Figure 3.7	Rhéogramme d'un échantillon de mayonnaise	62
Figure 3.8	Estimation du modèle d'écoulement de la mayonnaise	62
Figure 3.9	L'appareillage utilisé pour la mesure des tailles des particules	64
Figure 3.10	Microscope optique couplé à une caméra d'acquisition d'images	65
Figure 3.11	Image agrandie d'un échantillon de mayonnaise obtenue à l'aide d'un microscope optique en utilisant deux objectifs différents	67
Figure.3.12	Image du micromètre agrandie sous le microscope	68
Figure 3.13	Comportement d'un mélange huile/eau en l'absence d'agent émulsifiant	69
Figure 3.14	Structure de l'eau et l'huile	69
Figure 3.15	Structure de la lécithine	70
Figure.3.16	Rôle des tensioactifs dans la stabilisation de la mayonnaise	71

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau 2.1	Les coefficients de viscosités utilisés dans l'étude des dispersions	34
Tableau 3.1	Les ingrédients des échantillons de mayonnaise et de yaourt.	51
Tableau 3.2	Equation de calcul des paramètres d'écoulements	56
Tableau 3.3	Les résultats expérimentaux de l'échantillon de yaourt	57
Tableau 3.4	Les calculs de l'échantillon de yaourt	57
Tableau 3.5	Les résultats expérimentaux de l'échantillon de yaourt	60
Tableau 3.6	Les Résultats des calculs de l'échantillon de mayonnaise	61

Liste des sigles

τ_s : contrainte seuil

A : air (m^2)

a : le taux de rupture structurelle pour l'échantillon

B : constante pour les fluides thixotropiques

C : la concentration de la solution

D : la valeur de l'effort à $t=1s$

E / H : eau dans huile

F : la force en newton (N)

H / E : huile dans l'eau

I : le courant

K : la consistance structurelle du fluide

L : dimensions de longueur

M : dimensions de masse

n : l'indice de structure du fluide en $Pa s^n$

n_H : l'indice d'écoulement

P : la contrainte de cisaillement initiale

R : la résistance électrique

T : dimensions de temps

u : Déplacement en mètre

U : différence de potentiel

V : la vitesse (mètre /seconde)

x : la distance qui sépare la particule du plan solide inférieur

α : une constante qui a l'unité de SI

γ : le taux de cisaillement

η : la viscosité dynamique de la dispersion en centpoise (CP)

η_C : la viscosité de Casson

η_S : la viscosité dynamique

$\eta_{\text{Réel}}$: la viscosité réel sans dimensions

η_B : la viscosité plastique de Bingham

η_p : la viscosité plastique

η_{sp} : la viscosité intrinsèque sans dimensions

λ : paramètre structurel dépendant du temp

τ_{yB} : la contrainte seuil de Bingham

τ_{yC} : contrainte de casson

τ_{yHB} : la contrainte seuil de Herschel-Bulkley

τ : le contrainte de cisaillement

τ_e : la contrainte de cisaillement à l'équilibre

Φ_g : la fraction volumique du verre de transition de la sphère dure

ϕ_{rep} : le fractionnement du volume de l'emballage proche au hasard

ϕ : la fraction volumique des gouttelettes

Liste des Abréviations

CGS : centimètre gramme seconde

H-B : Bingham et Herschel-Bulkley

ISC : IS capture

SI : système international

SN : rhéofluidifiant

S-T : rhéoépaississant

Introduction générale

L'industrie agroalimentaire est extrêmement complexe, diversifiée et évoluée. Avec un marché de consommation de plus en plus sophistiqué et exigeant, il y a un besoin continu d'innovation, lors de la formulation, de la préparation, de la transformation et du stockage des produits alimentaires, puisque ces derniers sont des matériaux vivants, subissant constamment des modifications de forme, de taille, de structure, ils sont donc sensibles à l'humidité, à la température, à l'oxygène, etc., d'où la nécessité d'étudier le produit alimentaire principalement sous des aspects nutritionnels, d'une part, et biochimiques, d'autre part. Le produit alimentaire peut être regardé comme un matériau possédant des propriétés mécaniques, propriétés qui influenceront grandement sa texture finale. Des méthodes autres que sensorielles, et relevant de la rhéologie, permettent d'évaluer ces paramètres texturaux [1,2].

Il existe de nombreux domaines où les données rhéologiques sont nécessaires dans l'industrie agroalimentaire [3,4] :

1. le dimensionnement des différents équipements tels que les tubes, les pompes, les extrudeuses, les mélangeurs, les enduiseuses, les échangeurs de chaleur, les homogénéisateurs...etc.

2. l'identification de la fonctionnalité des ingrédients et la bonne sélection de ces derniers ce qui permet l'amélioration du produit et l'optimisation du procédé de préparation ;

3. le contrôle de qualité intermédiaire et final du produit ;

4. essais de durée de conservation et mesure de la stabilité lors de la préparation et durant le stockage du produit fini ;

5. l'évaluation de la texture des aliments par corrélation avec les données sensorielles ;

6. l'analyse d'équations rhéologiques d'état.

Personne n'est vraiment un débutant quand il s'agit de la rhéologie, parce que les propriétés d'écoulement des liquides jouent un rôle important dans notre vie quotidienne. Cette

importance varie, par exemple, de la viscosité du sang qui s'écoule dans nos corps, à travers l'épaisseur des liquides que nous avalons, à la qualité de l'huile que nous mettons dans nos moteurs de voiture. En tant que consommateurs, on nous dit non seulement que les produits sont « nouveaux et améliorés », mais aussi qu'ils sont « épais ou pas », parce que ces propriétés rhéologiques sont plus agréables à l'œil, à la bouche et à la main [5].

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude de la rhéologie des aliments fluides et semi-solides qui a considérablement progressé au cours de ces dernières décennies, puisque les aliments liquides et semi-solides englobent un large éventail de compositions, de structures et présentent un comportement rhéologique d'une part, et d'autre part beaucoup d'aliments solides se trouvent à l'état liquide à un certain stade de leur fabrication.

Hormis l'introduction et la conclusion, le manuscrit, résultat de ce travail, est organisé en trois grands chapitres.

Le premier chapitre est consacré en une introduction aux produits alimentaires, dans lequel nous avons apporté quelques définitions rencontrées dans le domaine. La texture, sa définition, ses caractéristiques et ses propriétés sont ensuite présentées. Il est question aussi dans ce chapitre, des émulsions, leur classification, leur rhéologie et les différents facteurs influençant leur stabilité, et avons ciblé deux types de produits alimentaires qui sont la mayonnaise et le yaourt qui sont présentés d'une façon générale en nous basant sur leur texture et leur comportement rhéologique. Ces deux produits sont étudiés dans la partie expérimentale.

Dans le deuxième chapitre, après un rappel de notions de bases de la rhéologie, sont présentés les différents comportements rhéologiques des fluides lorsqu'ils sont soumis à des contraintes de cisaillement. Les modèles permettant la description des écoulements des fluides ont été présentés, en précisant l'applicabilité de ces modèles aux différentes classes de comportement.

Dans le troisième chapitre sont exposés dans un premier temps le large éventail des matériels et méthodes mis en œuvre dans le cadre du travail expérimental qui a été divisé en deux parties, une partie a été consacrée à la caractérisation rhéologique de deux produits alimentaires : le yaourt et la mayonnaise, tandis que l'autre partie a été consacrée à une étude sommaire de la stabilité des émulsions, en considérant le cas de la mayonnaise.

Chapitre : 1

Généralités sur les produits alimentaires

Chapitre 1 : Généralités sur les produits alimentaires

1.1 Introduction

Les produits alimentaires sont des matériaux structurés très complexes, composés d'eau, de protéines, de glucides, de graisses et d'une quantité importante de fibres. Tous ces constituants influent de manière significative sur le comportement d'écoulement et de la structure des aliments, et par conséquent, leurs propriétés rhéologiques sont très différentes des matériaux polymères classiques. Il y a divers facteurs qui affectent la stabilité des fluides structurés. La viscosité de la phase liquide dont les dispersions joue principalement un rôle majeur dans les propriétés d'écoulement du matériau. La rhéologie alimentaire n'est plus seulement une mesure de la viscosité apparente. Avec le temps et les progrès de l'instrumentation, la rhéologie alimentaire fournit aujourd'hui des informations plus approfondies sur la microstructure et la fluidité d'un aliment.

1.2 Texture des aliments

La texture et la saveur (à savoir, l'arôme et le goût) sont deux constituants majeurs de la sapidité alimentaire. La texture est importante, en particulier pour les aliments solides, car les changements de celle-ci se produisent de façon plus marquée dans les aliments solides que dans les aliments liquides pendant le traitement oral [6]. L'importance de la texture dans l'acceptabilité globale des aliments varie considérablement selon le type de nourriture. Nous pourrions le diviser arbitrairement en trois groupes :

Critique : Les aliments dans lesquels la texture est la caractéristique de qualité dominante ; par exemple, la viande, les croustilles, les flocons de maïs et le céleri.

Important : Les aliments dans lesquels la texture apporte une contribution significative mais non dominante à la qualité globale, contribuant, plus ou moins également, à la saveur et à l'apparence ; par exemple, la plupart des fruits, des légumes, des fromages, du pain, de la plupart des autres aliments à base de céréales et des bonbons entrent dans cette catégorie.

Mineur : les aliments dans lesquels la texture contribue de manière négligeable à la qualité globale ; les exemples sont la plupart des boissons et des soupes minces [7].

La texture, appliquée aux aliments, a été définie de différentes façons. Bourne [7] a énuméré quelques définitions différentes. Nous citerons la définition donnée par l'Organisation internationale de normalisation, selon laquelle la texture englobe tous les attributs rhéologiques et structuraux (géométriques et de surface) d'un produit alimentaire perceptible au moyen de récepteurs mécaniques, tactiles et, le cas échéant, visuels et auditifs [8]. Nous pouvons dire que la texture des aliments a les caractéristiques suivantes :

1. C'est un groupe de propriétés physiques qui dérivent de la structure de la nourriture.
2. Elle relève de la sous-position mécanique ou rhéologique des propriétés physiques. Les propriétés optiques, les propriétés électriques et magnétiques et les propriétés thermiques sont des propriétés physiques qui sont exclues de la définition de la texture.
3. Il se compose d'un groupe de propriétés, pas une seule propriété.
4. La texture est principalement détectée par la sensation de toucher, habituellement dans la bouche, mais d'autres parties du corps peuvent être impliquées (souvent les mains).
5. Il n'est pas lié aux sens chimiques du goût ou de l'odeur.
6. La mesure objective est effectuée au moyen de fonctions de masse, de distance et de temps seulement ; par exemple, la force a les dimensions MLT^{-2} , le travail a les dimensions ML^2T^{-2} , et le flux a les dimensions L^3T^{-1} .

1.3 Propriétés de texture de différents types d'aliments

Les propriétés de texture varient considérablement d'un type d'aliment à l'autre, tout comme les intérêts de texture des consommateurs. Par exemple, notre souci de texture pour une boisson est plus sur son comportement d'écoulement, mais pour un produit solide tel que le biscuit, la façon dont il se fracture devient une préoccupation majeure. Par conséquent, il est nécessaire d'identifier les propriétés de texture clés au niveau de la catégorie en fonction des différentes formes physiques de l'aliment : solide et fluide

1.3.1 Propriétés texturales des aliments solides

Un solide se caractérise par sa rigidité structurelle et sa résistance aux changements de forme et de volume. Dans le cas des produits alimentaires, un solide peut en outre être divisé en deux groupes : solide sec et solide humide. En ce qui concerne l'alimentation, l'absorption d'humidité et la libération d'humidité sont les deux caractéristiques les plus distinctives des deux

sous-groupes respectifs. Un aliment solide sec (par exemple, des biscuits, des chips) a une faible teneur en humidité, ce qui nécessite souvent des conditions d'emballage et de stockage pour minimiser l'absorption d'humidité. Un aliment solide humide tel que les fruits et légumes contient une grande quantité d'humidité (jus). La perte d'humidité pendant le stockage est souvent une préoccupation principale.

Souplesse courte. Mécaniquement, les aliments solides ont normalement une contrainte de déformation légère contre la fracture. Le test de rupture est le moyen le plus efficace de caractériser la texture des aliments solides secs. Une caractéristique typique de la courbe force-déplacement est une relation linéaire courte avant une rupture structurelle soudaine et souvent catastrophique (Figure 1.1). La force de rupture et la contrainte de rupture sont deux paramètres quantifiables qui ont des corrélations directes avec l'expérience sensorielle d'un tel aliment.

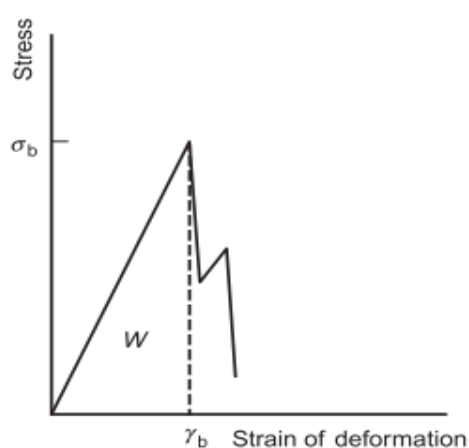


Figure 1.1 : Une courbe force déplacement typique de l'aliment solide [9]

Le rapport de ces deux facteurs donne le module de Young, un paramètre physique dérivé auquel il est fait référence dans la littérature pour la caractérisation de texture. La zone sous la ligne de force donne une estimation de la quantité de travail nécessaire pour briser l'aliment. La dureté et la fragilité sont probablement les termes de texture les plus pertinents pour les aliments solides. Le caractère croustillant, croustillant et friable, ainsi que l'adhésivité, sont également couramment utilisés pour les descriptions de texture de ce type d'aliments [9].

1.3.2 Texture d'aliments solides mous

Dans de nombreux cas, le semi-solide est également utilisé pour représenter le même groupe de matières alimentaires. Un consensus général est qu'un solide mou a des caractéristiques structurelles similaires à celles d'un solide, telles que sa forme et sa géométrie, mais un solide mou nécessite une contrainte beaucoup plus faible pour la déformation. En outre,

il peut être déformé en une contrainte beaucoup plus importante sans défaillance structurelle majeure.

Le solide mou couvre probablement la plus large gamme de produits alimentaires offrant les expériences de texture les plus riches possibles. La variation de texture riche de ce type de nourriture provient des réponses très différentes de solide mou à une contrainte appliquée. La résistance à la déformation peut être résumée en quelques grands types, comme le montre la figure 1.2. Le type d'aliment A a une élasticité initiale suivie d'une défaillance majeure de la structure.

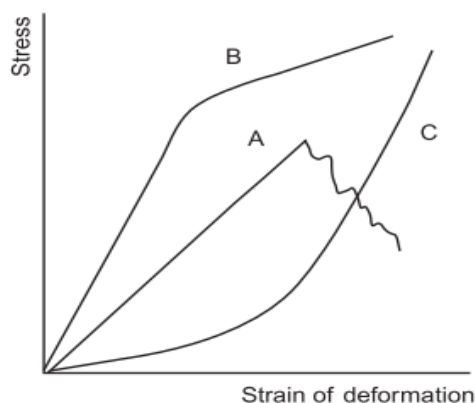


Figure 1.2 : Une représentation schématique des trois différents types de courbes force-déplacement pour les aliments solides mous [9]

Le type d'aliment B présente également une élasticité linéaire initiale, mais des dommages structurels permanents commencent à se produire une fois que la contrainte est supérieure à sa limite d'élasticité. Le type d'aliment C a une courbe en forme de J. Il est d'abord facilement déformable, mais il devient difficile de se déformer à forte déformation, un cas d'écrouissage.

La caractérisation de la texture d'un solide mou est beaucoup plus compliquée que celle d'un solide. La fermeté est probablement le terme de texture le plus connu pour ce type d'aliment, se référant à la résistance de la nourriture contre la déformation. Ce terme peut généralement être estimé de façon satisfaisante soit par le module de Young, soit par la contrainte de rupture obtenue à partir de la courbe force-déplacement. La cohésion, l'élasticité, l'adhérence et ainsi de suite sont également couramment utilisés pour les descriptions de texture de tels systèmes alimentaires. La discrimination de texture est aussi la plus délicate et la plus difficile parmi les aliments de ce type [9].

1.3.3 Texture d'aliments fluides

Les aliments fluides désignent les produits alimentaires qui peuvent s'écouler, des boissons à très faible viscosité aux matériaux hautement cohésifs qui peuvent presque être classés dans la catégorie des solides mous. La caractéristique la plus évidente de ce type de nourriture est sa facilité de déformation. Un aliment liquide ne peut pas résister à la gravité et s'écoule même sous une contrainte minimale. Pendant la consommation, une nourriture fluide ne nécessite pas de mâcher, mais se déforme et s'écoule entre la langue et le palais dur. En raison de l'absence de mastication, un aliment fluide à faible viscosité (par exemple, des boissons) tend à avoir une durée de séjour orale beaucoup plus courte (temps de séjour oral). Une fois ingérée, une nourriture liquide va presque directement à la déglutition. Pour certains aliments fluides hautement cohésifs ou à haute viscosité (par exemple, miel, beurre de cacahuète), une manipulation orale est nécessaire par pression de la langue pour assurer un mélange et une dilution appropriés de la salive pour la libération de l'arôme et la déglutition facile [10].

La viscosité et la fluidité sont probablement les propriétés physiques les plus importantes influençant la sensation de texture d'un aliment fluide. Au cours des dernières décennies, une grande partie de la littérature sur la texture des aliments portait sur la mesure de la viscosité ou l'étude de la rhéologie des fluides [11]. La sensation de viscosité ou de consistance peut être prédite de la manière la plus satisfaisante par les approches rhéologiques, du moins pour les fluides quasi-newtoniens. Un défi majeur dans l'étude de la sensation de viscosité orale est le fait que la plupart des aliments fluides sont non newtoniens et que leurs viscosités apparentes dépendent du taux de cisaillement [9].

Une autre caractéristique principale de la nourriture fluide est la formation immédiate d'une couche mince sur les surfaces buccales après l'ingestion. Le mouvement relatif de la surface devient d'une importance critique en raison de la manipulation de la langue contre le palais dur ou d'autres parties des surfaces buccales.

La formation de la couche mince et le mouvement relatif de la surface pendant le processus oral de nourriture fluide ont les caractéristiques essentielles d'une configuration de tribomètre. Sur la base de cette reconnaissance, la tribologie « orale » ou la lubrification « orale » a été acceptée comme une approche importante pour l'étude de la texture des aliments fluides [9].

1.4 Les émulsions et la rhéologie

En général, les émulsions sont classées en fonction du type de matériaux non miscibles qui constituent les phases dispersées et continues. Les émulsions constituées d'une phase huileuse dispersée dans une phase aqueuse continue sont appelées émulsions H / E, tandis que les émulsions constituées d'une phase aqueuse dispersée dans une phase huileuse continue sont appelées émulsions eau-dans-huile (E / H) (figure 1.3). Le lait, la crème, les desserts, les trempettes, les sauces, les soupes et les pansements sont tous des exemples d'émulsions H / E, tandis que le beurre et la margarine sont des exemples d'émulsions E / H. La plupart des produits alimentaires à base d'émulsion existants appartiennent à ces deux catégories d'émulsions.

Néanmoins, la classification des émulsions basée sur leur organisation structurale est devenue plus complexe récemment grâce au développement d'une large gamme d'émulsions structurées visant à répondre à des défis spécifiques. Ces émulsions structurées peuvent être classées en fonction de la composition des différentes phases dispersées ou de la taille des gouttelettes en phase dispersée.

Certaines émulsions complexes peuvent contenir deux (ou plus) phases de gouttelettes dispersées, et elles sont catégorisées en fonction de l'emplacement de la phase dispersée primaire (la plus interne). Des exemples d'émulsions multiples sont l'huile dans l'eau dans l'eau (H / E1 / E2), l'eau dans l'huile dans l'eau (H1 / E / H2) et l'huile dans l'eau dans l'huile (E1 / H / E2) [9].

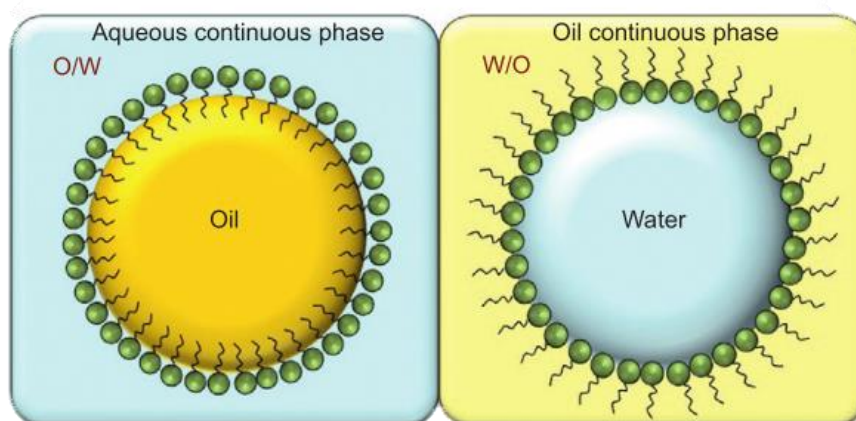


Figure 1.3 : Diagramme schématique d'émulsions simples - émulsion huile-dans-eau (H / E) et émulsion eau-huile (E / H) [9].

La rhéologie comprend la réponse d'une substance à une certaine déformation avec la mesure et l'explication de cette réponse en utilisant la description des mathématiques et de la science [12]. La déformation est créée en appliquant une force à un matériau et en provoquant

ainsi la déformation et / ou l'écoulement du matériau. La quantité de cette déformation et / ou de cet écoulement est liée aux propriétés physicochimiques du matériau.

Les propriétés macroscopiques constitutionnelles d'une émulsion affectent la relation entre la contrainte et la déformation et varient avec la composition, les interactions interfaciales et la structure et la taille des gouttelettes microscopiques. Le type d'une émulsion peut être modifié d'un simple liquide visqueux en un solide élastique en changeant la fraction volumique des gouttelettes ϕ , comme montré schématiquement sur la Fig.1.4. Les arrangements des particules dépendent du volume des particules par rapport au volume total. On n'observe pas de cisaillement en régime dilué à de faibles concentrations, de sorte que les particules sont sous forme sphérique. L'élasticité résulte du travail effectué contre la tension interfaciale. Avec l'augmentation de cisaillement, la surface de gouttelettes qui sont déjà comprimées commence à augmenter. Pour les faibles fractions volumiques, le rayon des gouttelettes est faible par rapport à la distance moyenne qui les sépare. Par conséquent, étant uniquement sous l'effet des forces browniennes, les gouttelettes circulent librement dans le milieu. À mesure que la fraction volumique augmente, les forces browniennes commencent à perdre leur effet sur les particules en raison de leur proximité avec d'autres particules ; ainsi les interactions hydrodynamiques et la probabilité de collision entre particules deviennent importantes. Tous ces effets font que les gouttelettes changent de forme et finissent par être comprimées sous la forme entièrement compacte. Comme la fraction de volume atteint la fraction de volume de transition vitreuse de sphère dure, les gouttelettes commencent à être mises en cage par leurs voisines. Lorsque la fraction volumique se rapproche de 1, un agencement hexagonal compact est observé et une mousse bi-liquide se forme [13].

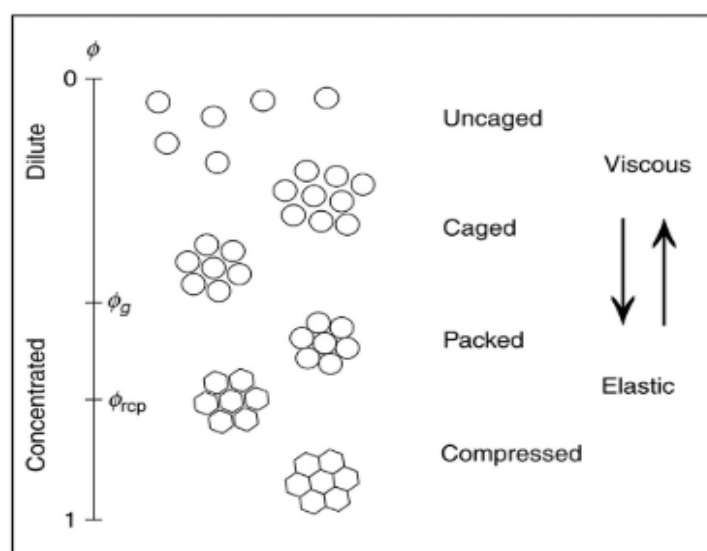


Figure 1.4 : Représentation schématique 2D de la structure positionnelle des gouttelettes trouvées dans les

émulsions mono-dispersés en fonction de la fraction volumique de la phase dispersée (ϕ). Φ_g représente la fraction volumique de transition vitreuse de la sphère dure et ϕ_{rep} représente le fractionnement du volume de l'emballage proche au hasard [9]

Ainsi, la rhéologie des émulsions alimentaires dépend principalement de la force des interactions inter-gouttelettes. Les émulsions diluées ont un comportement newtonien de faible viscosité. Au contraire, les émulsions alimentaires concentrées présentent des caractéristiques rhéologiques semblables à celles d'un gel. Ce comportement peut être atteint en augmentant la fraction volumique de la phase dispersée. Cependant, de nombreux autres paramètres structurels influencent également la réponse rhéologique (visqueuse et viscoélastique) des émulsions (c'est-à-dire la taille des gouttelettes, la polydispersité, la déformabilité des gouttelettes, etc.).

La rhéologie des émulsions joue un rôle critique non seulement dans le traitement des aliments à base d'émulsion, mais aussi dans l'acceptation de ces aliments par le consommateur en ce qui concerne le goût, la texture et la sensation en bouche. Ainsi, il n'est pas surprenant de noter que la rhéologie des émulsions est un domaine de recherche très actif dans l'industrie alimentaire.

1.5 La stabilité des émulsions

De nombreux aliments, tels que ceux contenant du lait, du beurre, de la margarine, de la mayonnaise et de la crème glacée, sont émulsifiés. Dans la production et l'emballage à plus grande échelle, la plupart des aliments émulsifiés ont besoin d'émulsifiants pour stabiliser le mélange et empêcher la séparation des divers ingrédients. La granulométrie des gouttelettes de graisse ou d'huile dans une émulsion huile-dans-eau (H / E) et des gouttelettes d'eau dans une émulsion eau-dans-huile (E / H) et la rhéologie de l'émulsion influencent la sensation en bouche, et la libération d'arôme de l'émulsion. La stabilité de l'émulsion est le facteur le plus important de la sensorialité et du goût des aliments, et empêche la distribution spatiale des ingrédients au fil du temps, qui conduit à l'écémage, à la floculation et à la coalescence. Comme l'émulsion est intrinsèquement thermodynamiquement instable ; toutes les émulsions se décomposeraient après une période de stockage suffisamment longue. Une émulsion qui est stable à long terme, c'est-à-dire qui reste non séparée après plus d'un an, n'est que cinétiquement stable [14].

Avec le temps, les émulsions ont tendance à se décomposer en leurs phases constituantes d'huile et d'eau. Le terme « stabilité de l'émulsion » fait donc référence à la capacité d'une émulsion à résister à cette dégradation, comme indiqué par la croissance de la taille moyenne des gouttelettes ou la modification de leur distribution spatiale dans l'échantillon. Plus ces

propriétés changent lentement, plus l'émulsion est stable. En pratique, la stabilité est un terme relatif qui dépend du contexte. Pour certaines émulsions alimentaires, telles que les pâtes à gâteaux ou les sauces cuites, l'échelle de temps requise pour la stabilité n'est que de quelques minutes ou heures. Mais pour d'autres produits, tels que les boissons gazeuses et les liqueurs à la crème, la stabilité de l'émulsion doit être maintenue sur une période de plusieurs mois ou années [15].

La stabilité est le facteur le plus important à considérer dans la technologie des émulsions. Une émulsion est stable quand il n'y a pas de changement dans la distribution de la taille ou la disposition spatiale des gouttelettes sur l'échelle de temps expérimental. Les trois principaux mécanismes de déstabilisation sont la floculation, le crémage et surtout la coalescence des gouttelettes d'huile.

L'écémage résulte de l'action de la gravité sur les gouttelettes d'huile, de densité inférieure à celle du milieu continu, ce qui donne un gradient vertical de concentration des gouttelettes mais aucun changement dans la distribution globale des tailles. La rupture de l'émulsion peut être détectée par l'apparition d'une phase aqueuse séparée au fond. L'agrégation des gouttelettes sans rupture de la couche d'émulsifiant est appelée floculation. La floculation peut souvent être une étape intermédiaire de la rupture de l'émulsion par coalescence, ce qui implique que le processus irréversible des gouttelettes devient plus important, donnant une phase d'huile fuyante au sommet de l'échantillon.

1.6 Facteurs affectant la stabilité de l'émulsion

En général, la stabilité de l'émulsion dépend de la distribution de la taille des gouttelettes, de la rhéologie de la phase continue et des interactions inter particulaires, et toutes affectent la rhéologie générale de l'émulsion. Les paramètres structuraux, la rhéologie en masse et la stabilité de l'émulsion sont interdépendants. En plus de cela, tous sont influencés de manière décisive par les conditions de traitement.

L'un des facteurs les plus importants affectant la stabilité de l'émulsion est la distribution de la taille des gouttelettes. C'est un fait bien connu que les émulsions fines avec des distributions étroites donnent une stabilité plus élevée que les émulsions grossières avec de larges distributions. La taille la plus faible des gouttelettes favorise la stabilité contre le crémage puisque la vitesse de sédimentation est une fonction du diamètre des gouttelettes.

Un autre facteur crucial influençant la stabilité de l'émulsion est la force et la nature des interactions inter particulaires. Si les forces d'attraction dépassent les interactions répulsives

électrostatiques et / ou stériques, l'agrégation des gouttelettes d'huile se produit et la coalescence peut avoir lieu en fonction de la viscoélasticité superficielle de la couche superficielle. Néanmoins, si le minimum primaire d'énergie entre les gouttelettes d'approche n'est pas profond, la floculation est facilement réversible et temporaire. Comme cela a été mentionné précédemment, la floculation peut souvent être une étape intermédiaire de la rupture de l'émulsion, soit après la coalescence des gouttelettes d'huile. Cependant, dans les émulsions concentrées, un processus de floculation étendu peut favoriser la stabilité de l'émulsion en formant un réseau de particules de type gel faible où la phase continue est immobilisée dans les interstices.

La force et la nature des interactions entre les gouttelettes dépendent du type et de la concentration des émulsifiants utilisés, qui déterminent si la floculation est réversible ou irréversible. L'extension de ce processus d'agrégation influence la rhéologie globale des émulsions.

Une stabilisation supplémentaire peut résulter de la présence de faibles concentrations de polysaccharides hydrosolubles, les hydrocolloïdes, qui agissent comme agents épaississants ou structurants dans la phase continue. La fonction principale de ces hydrocolloïdes est de réduire la mobilité des gouttelettes d'huile, en diminuant les phénomènes de floculation et de crémage [16].

1.7 Rhéologie de la mayonnaise et du yaourt

1.7.1 Mayonnaise

La mayonnaise est une émulsion huile-dans-eau. Elle est traditionnellement préparée en mélangeant soigneusement un mélange de jaune d'œuf qui joue le rôle d'émulsifiant (lécithine), de vinaigre, d'huile et d'épices (en particulier de moutarde) pour maintenir une mousse serrée de gouttelettes d'huile ; Elle peut également contenir du sel, du sucre ou des édulcorants, et d'autres ingrédients facultatifs. La phase continue aqueuse des sauces émulsionnées présente une forte viscosité. Elle est constituée de protéines solubles ou insolubles, de sucres solubles ou gélifiés, d'agents acidifiants, de minéraux et d'additifs. La phase dispersée, constituée de globules gras, d'agrégats protéiques et de stabilisants, présente une granulométrie allant de 1 à 10 µm. Dans la mayonnaise, la teneur en huile est généralement supérieure à 70% et les gouttelettes sont relativement proches les unes des autres. La mayonnaise présente des propriétés viscoélastiques dues au réseau formé par les lipoprotéines adsorbées autour des gouttes d'huile avoisinantes. Elle a une structure de type gel faible [17].

La mayonnaise est l'un des matériaux qui ne s'écoulent que si une contrainte suffisante, appelée contrainte seuil, est appliquée, on appelle ce type des fluides : les fluides à seuil. Dans ce dernier on distingue les fluides à seuil simples – dont le comportement ne dépend pas, ou peu, de l'histoire d'écoulement – des fluides à seuil thixotropes. Pour identifier à quel catégorie la mayonnaise appartient a priori, il suffit de comparer son aspect après un malaxage vigoureux et après un long temps de repos on voit que la mayonnaise garde la même consistance dans ces deux situations, il s'agit vraisemblablement d'un fluide à seuil simple. Ces matériaux ne s'écoulent que lorsque la contrainte de cisaillement τ qui leur est appliquée est supérieure à une contrainte seuil [18].

Lorsque $\tau \geq \tau_s$, ils sont en régime liquide. Leur caractère de fluide à seuil simple implique que l'état stationnaire est atteint quasi-instantanément (aux effets viscoélastiques près) lorsque l'on change abruptement le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ imposé, quel que soit l'état de départ en régime liquide. La loi de comportement la plus communément observée est une loi de Herschel-Bulkley.

Lorsque $\tau \leq \tau_s$, les fluides à seuil sont en régime solide et ont un comportement essentiellement élastique linéaire. Plus généralement, leur comportement est viscoélastique : ils ne se déforment pas instantanément sous l'effet d'un chargement. Le comportement viscoélastique solide le plus simple est celui de Kelvin-Voigt, qui se représente sous la forme d'un ressort et d'un piston en parallèle [18]. De nombreuses études ont affirmé que le compactage des gouttelettes d'huile dans le réseau était responsable des propriétés élastiques et de la résistance à la déformation de l'émulsion.

Les propriétés rhéologiques de la mayonnaise ont été étudiées à l'aide de différentes techniques rhéologiques : taux de cisaillement constants - contrainte de cisaillement-, taux de cisaillement dépendant du temps-contrainte de cisaillement, contrainte de croissance et de décroissance à taux de cisaillement constant, le comportement viscoélastique dynamique, et le comportement en fluage.

Différentes études sur la mayonnaise ont montré un comportement rhéofluidifiant thixotropes ou les propriétés d'écoulement dépendent à la fois du taux de cisaillement et du temps. Dans les émulsions concentrées, les gouttelettes sont suffisamment proches pour interagir les unes avec les autres, ce qui peut conduire à la formation d'un réseau tridimensionnel de gouttelettes agrégées. Lorsque le taux de cisaillement augmente, les forces hydrodynamiques provoquent la déformation des agrégats et finalement leur rupture, ce qui entraîne une réduction de la viscosité.

1.7.2 Yaourt

Le yaourt est un produit laitier coagulé obtenu par fermentation à l'aide de bactéries lactiques thermophiles (*Lactobacillus delbrueckii* sous espèce *bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*) à partir du lait frais ainsi que du lait pasteurisé avec ou sans addition de substances (lait en poudre, les protéines...), dans le produit final nommé youghurt, yoghurt ou yaourt, les microorganismes doivent être viables et abondants [19].

Le lait qui sert à préparer ce produit est une émulsion formée par un mélange aqueux de lactosérum, dont lequel sont dispersés des micelles de caséines et de globules gras.

Selon la technologie de fabrication, les yaourts sont divisés en deux catégories :

- Les yaourt fermes, dont la fermentation a lieu en pots qui sont généralement des yaourts natures où aromatisés.

- Les yaourts brassés, dont la fermentation a lieu en cuve avant le conditionnement qui sont généralement des yaourts brassés natures ou aux fruits, dans ce type, la structure du gel formé pendant la fermentation est modifiée durant le processus refroidissement ce qui permet de donner au produit qui sera un fluide à comportement semi visqueux un caractère lisse [20,21].

Pour des yaourts brassés sans matière grasse, afin d'améliorer l'apparence, la viscosité et la consistance de ces derniers, des agents de textures (épaississants ou gélifiants) sont souvent ajoutés (gélatine, celluloses, amidons, etc.) avec des concentrations qui sont déterminées en fonction de leur pouvoir épaississant et leur pouvoir gélifiant, ce qui conduit à la mise en place d'une structure complexe et d'un changement important des propriétés rhéologiques [22].

Une meilleure connaissance du comportement rhéologique du yaourt est nécessaire afin d'aider à la conception et au dimensionnement des installations de transformation, sous réserve de maîtriser les contraintes (cisaillements) notamment lors des étapes de brassage et de pompage et aussi lors des échanges de chaleur. La connaissance des propriétés rhéologiques permet d'autre part d'appréhender la qualité en termes de texture des produits finis.

Le yaourt se comporte comme un fluide viscoélastique, il présente à la fois les propriétés élastiques d'un solide et les propriétés visqueuses d'un liquide. Le comportement rhéologique du yaourt est non-newtonien, ce qui veut dire que sa viscosité dépend de la vitesse de cisaillement ou de la contrainte exercée. Lors de l'établissement d'une contrainte (cisaillement)

sur ce produit, sa viscosité change, elle est fonction de la vitesse de cisaillement et de la contrainte appliquée, elle diminue quand la vitesse de cisaillement augmente et donc se comporte comme un fluide rhéofluidifiant (section 2.2.2.1.1) décrit par le modèle de Herschel-Bulkley (section 2.4.1.4), qui se simplifie par une relation de puissance (section 2.4.1.2) pour un yaourt brassé.

Par ailleurs le comportement rhéologique des yaourts est dépendant des traitements mécaniques subis ultérieurement, en particulier, les étapes de pompage conduisent à une destruction partielle du gel. Si les contraintes de cisaillement sont très fortes, le gel ne retrouve plus sa structure initiale (le réseau du gel se dégrade progressivement, sous l'effet de cisaillement en chaînes de taille de plus en plus petites). C'est un fluide partiellement thixotrope (section 2.2.2.2.1). Ce dernier comportement révèle l'importance primordiale de connaître et de maîtriser l'histoire du produit dans le procédé [22]. Une illustration du caractère rhéofluidifiant thixotrope des yaourts est présentée sur la figure suivante :

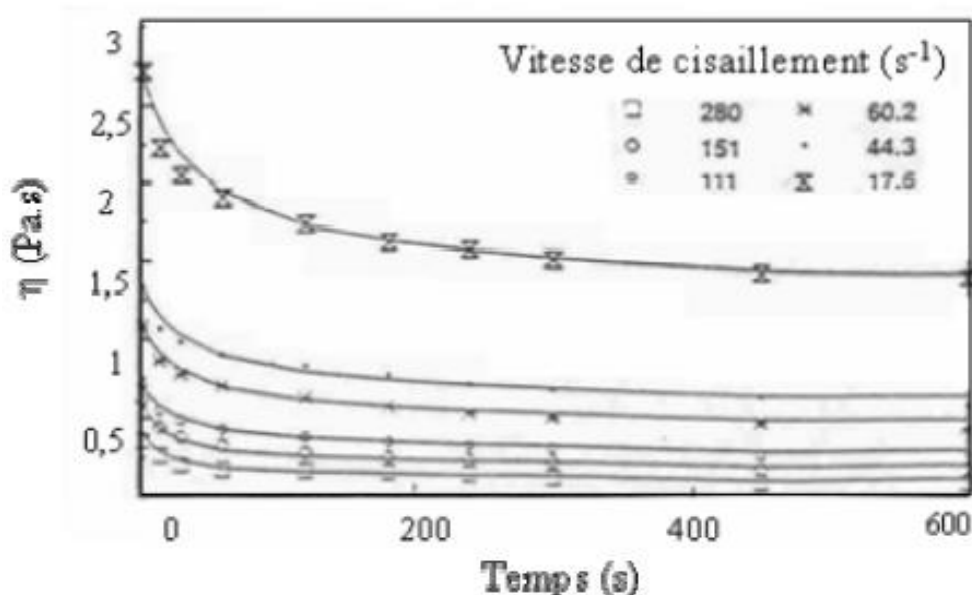


Figure 1.5. Caractère rhéofluidifiant et thixotrope du yaourt brassé. Evolution de la viscosité apparente d'un échantillon de yaourt brassé soumis à différentes vitesses de cisaillement [46].

Chapitre 2 :
Etude des propriétés
rhéologiques

Chapitre 2 : Etude des propriétés rhéologiques

Par définition, La rhéologie (le terme fut inventé par Eugène Bingham en 1928, à partir du mot grec « rhéo » qui signifie écoulement) est ainsi la science qui étudie et décrit la déformation, l'écoulement et la rupture de corps solides, liquides ou matériaux pulvérulents sous l'effet d'une contrainte. La mesure des propriétés rhéologiques des produits alimentaires permet de prévoir leur comportement mécanique au cours des différentes étapes de l'élaboration de l'aliment [1]. En raison de la nature biologique des aliments, la rhéologie alimentaire offre de nombreuses possibilités d'études uniques et il existe un grand nombre de documents sur la rhéologie alimentaire. Les propriétés rhéologiques sont basées sur les réponses d'écoulement et de déformation des aliments lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. Une étude approfondie de la rhéologie des aliments fluides exige la connaissance des principes de base de l'écoulement des fluides.

2.1 Notions de base

Pour définir certains paramètres rhéologiques fondamentaux, le modèle à deux plaques est utilisé. (Figure 2.1). On place une couche du fluide entre deux plaques parallèles, d'aire A et espacées d'une distance h , formant ainsi une cellule de cisaillement. On applique une force F à la plaque supérieure, qui se déplace alors à la vitesse V . On suppose que les conditions de cisaillement suivantes existent [23] :

-L'échantillon adhère aux deux plaques et ne glisse pas le long de celles-ci.

-Il y a des conditions d'écoulement laminaire (c'est-à-dire un écoulement sous la forme de couches). Par conséquent, aucun écoulement turbulent ne se produit.

Le calcul précis des paramètres rhéologiques n'est possible que si les deux conditions sont remplies.

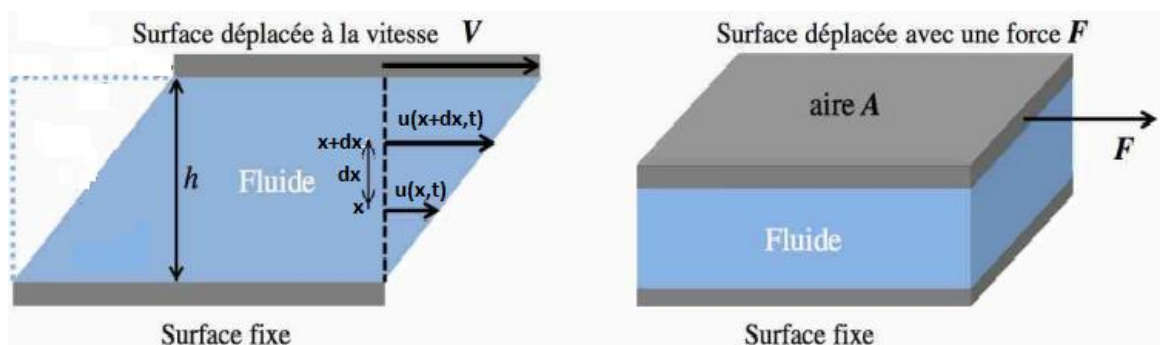


Figure 2.1 : Vitesse d'écoulement d'un fluide en utilisant le modèle à deux plaques pour les essais de cisaillement [24]

2.1.1 Contrainte de cisaillement (Shear stress)

Le fluide peut être modélisé comme un empilement de couches qui glissent les unes par rapport aux autres, il apparaît en effet des forces de frottement entre les couches, forces qui s'exercent tangentiellement à la surface de ces couches[25]. Le rapport entre la force F [N] appliquée et l'aire A [m²] de la surface permet ainsi de définir la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie ce qu'on appelle la **Contrainte de cisaillement**, notée τ et qui est définie par la relation suivante :

$$\tau = F/A \quad (2.1)$$

L'unité de la contrainte de cisaillement est le « pascal » [Pa]ou [dyne/cm²].

2.1.2 Déformation de cisaillement (shear strain)

Afin de définir la déformation de cisaillement, il est préférable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement [26] décrit par le modèle précédent (figure 2.1). Comme on peut remarquer sur la partie gauche de la figure, après un certain temps, chaque particule de matière qui se trouve dans une certaine section droite aura parcouru la distance $u(x, t)$, x étant la distance qui sépare la particule du plan solide inférieur.

La déformation de cisaillement est définie dans le cas de la symétrie plane par la relation :

$$\gamma(x, t) = \frac{du(x,t)}{dx} \quad (2.2)$$

Cette grandeur ne dépend pas du déplacement $u(x, t)$ lui-même, mais de la variation de ce déplacement lors d'un passage d'une couche à une autre couche infiniment voisine.

2.1.3 La vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement, notée $\dot{\gamma}$ est définie par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma(x,t)}{dt} \quad (2.3)$$

Il s'agit d'une vitesse de déformation. [25]

Dans le cas de la symétrie plane, par un simple remplacement on aura :

$$\dot{\gamma} = \frac{dv(x,t)}{dx} \quad (2.4)$$

La vitesse de cisaillement est donc un gradient de vitesse, c'est une mesure de la variation de la vitesse à laquelle les couches intermédiaires se déplacent les unes par rapport aux autres. Cette grandeur décrit le cisaillement que subit le liquide, son unité est la s^{-1} [27].

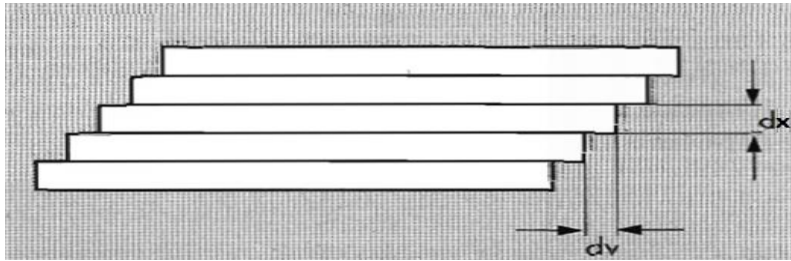


Figure 2.2 : Écoulement laminaire sous la forme de couches de fluide [23]

2.1.4 La viscosité

La viscosité, notée η , n'est que l'une des nombreuses propriétés rhéologiques pouvant être utilisées pour la caractérisation de matériaux dans des applications d'ingénierie.

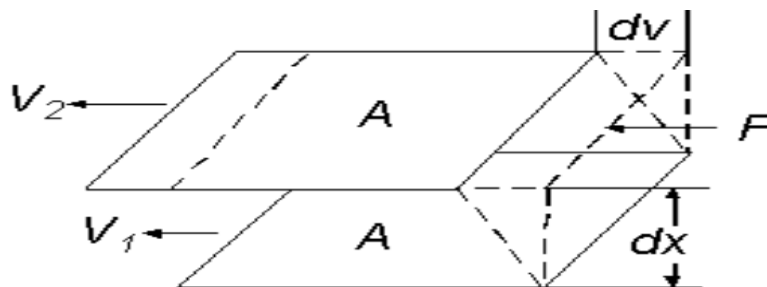


Figure 2.3 : Modèle de Newton pour la définition de la viscosité [28]

Isaac Newton a défini la viscosité en se basant sur le modèle représenté sur la figure 2.3. Deux plans parallèles de fluides de surfaces égales (A) sont séparés par une distance dx et se déplacent dans la même direction, à des vitesses différentes V_1 et V_2 . Newton a supposé que la force nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse était proportionnelle à la différence de vitesse à travers le liquide, ou gradient de vitesse. Pour exprimer cela, Newton a écrit :

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2.5)$$

Où :

η étant une constante pour un matériau donné, et appelé coefficient de viscosité dynamique ou viscosité de cisaillement.

Ainsi la viscosité est une grandeur permettant de quantifier la résistance à l'écoulement d'un fluide. Son unité est la poise (P) dans le système CGS, et le pascal seconde (Pa. s) dans le système SI.

Viscosité cinématique

Ce coefficient est défini par la relation :
$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.6)$$

Où ρ est la masse volumique du matériau.

Son unité est le cm^2/s encore appelée stokes(St) dans le système CGS, et le m^2/s dans le système SI.

➤ **Autres coefficients de viscosité**

Dans l'étude des solutions (des dispersions), afin de déterminer les influences respectives du soluté (de la phase dispersée) et du solvant (de la phase dispersante) dans le comportement rhéologique, on utilise fréquemment les coefficients de viscosité résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : les coefficients de viscosités utilisés dans l'étude des dispersions

Coefficient de viscosité	Relation mathématique	Notations
Relative	$\eta_{\text{Réel}} = \eta / \eta_s$	η : la viscosité dynamique de la dispersion η_s : la viscosité dynamique de la phase dispersée c : la concentration de la solution. η_{sp} et $\eta_{\text{Réel}}$ sont des grandeurs sans dimensions
Spécifique	$\eta = (\eta - \eta_s) / \eta_s$	
Intrinsèque	$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} [\eta_{\text{sp}} / c]$	

2.2 Le comportement rhéologique des fluides

Les principaux types de comportement d'écoulement de fluide peuvent être décrits au moyen de diagrammes (appelées rhéogrammes) où les contraintes de cisaillement sont tracées par rapport aux vitesses de cisaillement (figure), qui est la méthode conventionnelle.

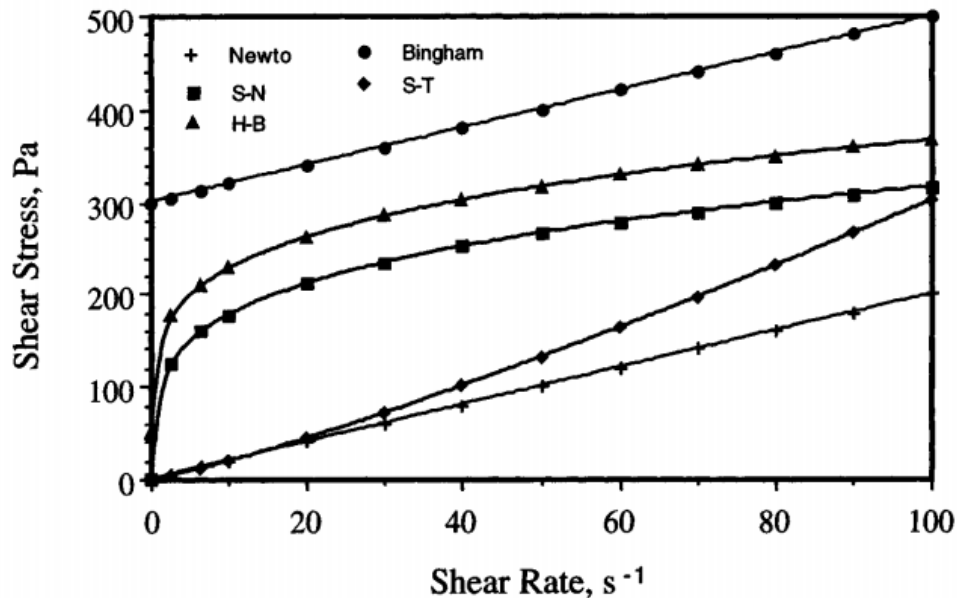


Figure 2.4 : Diagramme de cisaillement de base du taux de cisaillement et de la contrainte de cisaillement pour la classification du comportement d'écoulement indépendant du temps des aliments fluides : newtonien (Newto), rhéofluidifiant (S-N) et rhéoépaississant (S-T). Certains aliments ont une limite d'élasticité qui doit être dépassée pour que l'écoulement se produise : Bingham et Herschel-Bulkley (H-B) [29].

2.2.1 Les fluides newtoniens

Le liquide ayant des propriétés d'écoulement obéissant à l'hypothèse de Newton est appelé liquide de Newton-Stokes, ou liquide newtonien. Ces propriétés peuvent être formulées sous une forme standard :

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

Où : τ est la contrainte de cisaillement ;

$\dot{\gamma}$ Est le taux de cisaillement ;

η Est le coefficient de proportionnalité constant, appelé viscosité.

Le comportement d'un fluide newtonien est représenté graphiquement sur la figure 2.4

Le graphique montre que la viscosité du fluide reste constante lorsque le taux de cisaillement varie. Malheureusement, très peu de matériaux sont newtoniens. Seuls les fluides simples avec de petits édifices moléculaires sans interactions tels que les huiles de moteur fines et l'eau se comportent de cette façon [30].

2.2.2 Les fluides non newtoniens

Les fluides newtoniens sont les plus simples à mesurer, mais ils ne sont malheureusement pas aussi communs que le groupe de fluides plus complexes appelés non-newtoniens. Chhabra et Richardson ont défini le fluide non newtonien comme celui dont la courbe d'écoulement (contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement) est non linéaire ou ne passe pas par l'origine, c'est-à-dire où la viscosité apparente n'est pas constante à une température et à une pression donnée, mais dépend des conditions d'écoulement. Ces matériaux peuvent être facilement classés en trois catégories générales :

- Fluides non newtoniens au comportement indépendant du temps
- Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps
- Les fluides viscoélastiques

2.2.2.1 Fluides non newtoniens au comportement indépendant du temps

Ce sont des fluides, pour lesquels la vitesse de cisaillement en tout point ne peut être déterminée que par la valeur de la contrainte de cisaillement à ce moment-là. Ces fluides sont également connus sous le nom de fluides newtoniens purement visqueux, indépendants du temps, inélastiques ou généralisés.

2.2.2.1.1 Les fluids rhéofluidifiants (shear thinning)

C'est peut-être le type le plus largement rencontré de comportement de fluide non-newtonien indépendant du temps dans la pratique de l'ingénierie. Il est caractérisé par une viscosité apparente qui diminue progressivement avec l'augmentation du taux de cisaillement.

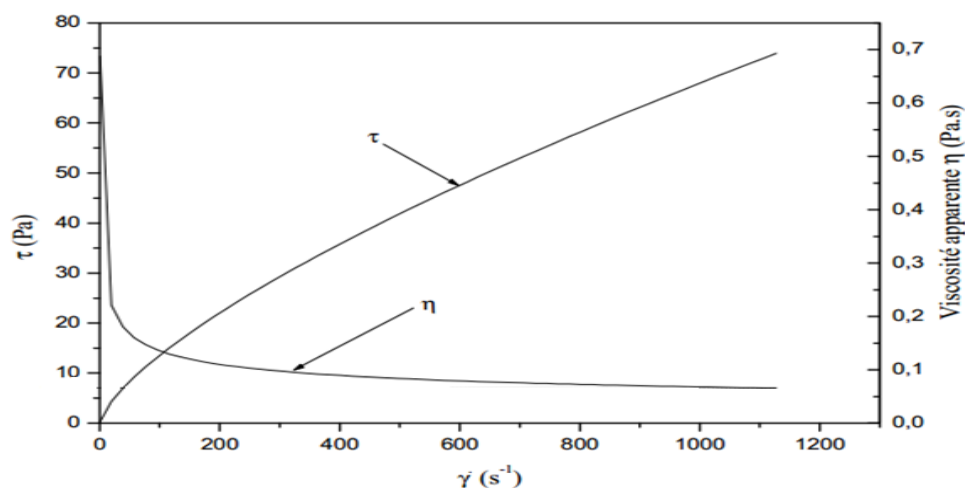


Figure 2.5 : Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéofluidifiant [31].

Pour expliquer ce phénomène très courant dans les fluides alimentaires, on peut penser qu'au repos, tous ces matériaux présentent un ordre interne irrégulier provoquant une résistance interne importante à l'écoulement, donc une viscosité élevée. Lors de l'augmentation du gradient de vitesse, les particules en suspension s'orientent dans le sens de l'écoulement, permettant un meilleur glissement des particules, provoquant ainsi une diminution de la viscosité. Dans la plupart des cas, l'effet rhéofluidifiant est réversible (souvent avec un certain retard). Les fluides reprennent alors leur viscosité originelle quand l'effet de cisaillement s'atténue ou lorsqu'il s'arrête [1].

A titre d'exemple les produits cosmétiques et de toilette sont parmi les fluides qui obéissent à ce type de comportement.

2.2.2.1.2 Fluides rhéoépaississants (shear thickening)

Par définition, c'est l'ensemble de tous les fluides dont les rhéogramme (figure 2.4) sont des courbes passant par l'origine et dont la concavité est tournée vers le haut (Une équation du type équation d'Ostwald $\tau = K \dot{\gamma}^n$ (2.8) avec $n > 1$ peut représenter correctement ce comportement) ; c'est bien que le coefficient de viscosité apparente ne soit pas constant mais augmente avec le cisaillement. Si l'augmentation de la viscosité s'accompagne d'une expansion de volume, ces fluides sont appelés fluides dilatants.

Le rhéoépaississement est beaucoup plus rarement observé que la rhéofluidification. Toutefois certaines suspensions concentrées (amidon de maïs par exemple) et le sable mouillé [32] sont des meilleurs exemples qui présentent fréquemment le comportement rhéoépaississant.

2.2.2.1.3 Fluides plastiques

Ces fluides ne s'écoulent qu'à partir d'une certaine contrainte, dite contrainte seuil. En dessous de celle-ci, ils se comportent comme des solides et au-delà ils s'écoulent comme un fluide newtonien ou rhéofluidifiant. Plusieurs modèles existent pour décrire le comportement rhéologique d'un fluide à seuil, la représentation la plus simple est le modèle de Bingham (1922) qui donne la relation suivante en contrainte et taux de cisaillement :

$$\tau - \tau_s = \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.9)$$

Où τ_s est la contrainte seuil et η_p la viscosité plastique.

Les matériaux présentant un comportement non newtonien rhéofluidifiant au-delà du seuil peuvent être décrit par la relation de Herschel-Bulkley (1926) :

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.10)$$

Où K et n sont respectivement la consistance et l'indice de structure du fluide.

L'allure de la courbe d'écoulement pour ce type de fluide est représentée sur la Figure 2.4.

La plasticité se rencontre dans certaines solutions de polymères et suspensions très concentrées, et dans la vie courante avec le dentifrice, le yaourt, le ketchup ou encore les argiles (bentonite par exemple) et les boues de forage [33].

2.2.2.2 Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps

De nombreuses substances, notamment dans les produits alimentaires, de produits pharmaceutiques et de produits de soins personnels, affichent des caractéristiques d'écoulement qui ne peuvent être décrites par une simple expression mathématique de la forme :

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.11)$$

Cela est parce que leurs viscosités apparentes ne sont pas seulement fonction de la contrainte de cisaillement appliquée ou de la vitesse de cisaillement, mais aussi de la durée pendant laquelle le fluide a été soumis au cisaillement.

Alors, que se passe-t-il lorsque le temps est considéré ? Cette question nous conduit à examiner deux types d'écoulement non-newtoniens supplémentaires : les thixotropes et les rhéopéctiques.

2.2.2.2.1 Fluides thixotropes

Les fluides thixotropes ont une viscosité qui diminue avec le temps quand une contrainte constante leur est appliquée. (Figure 2.6). Par définition la thixotropie est une variation réversible de la viscosité lorsqu'un fluide est soumis à une sollicitation, cela suppose que dès que la contrainte appliquée est arrêtée, la viscosité du matériau augmente de nouveau jusqu'à atteindre sa valeur d'origine au bout d'un certain temps.

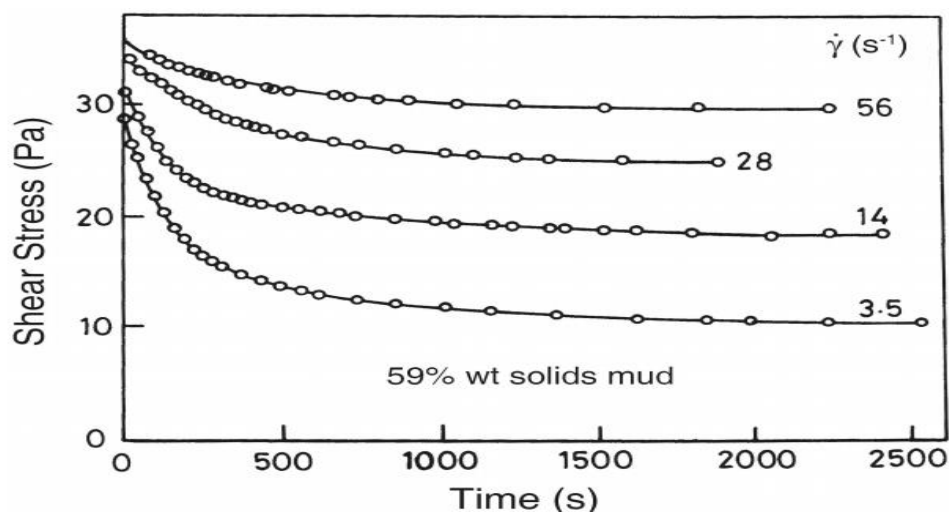


Figure 2.6 : Données expérimentales typiques montrant un comportement thixotrope dans une suspension de boues rouges [34]

La thixotropie est un phénomène rhéologique de grande importance industrielle. Elle est soit néfaste dans le cas du démarrage d'installations de pompage, soit recherchée, car il peut être intéressant d'avoir un matériau qui se liquéfie lorsqu'on le met en œuvre et qui se raidit lorsqu'on le stocke ou lorsqu'on le laisse au repos.

2.2.2.2 Fluides rhéopexes

C'est essentiellement 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 constant.

2.2.2.3 Comportement viscoélastique

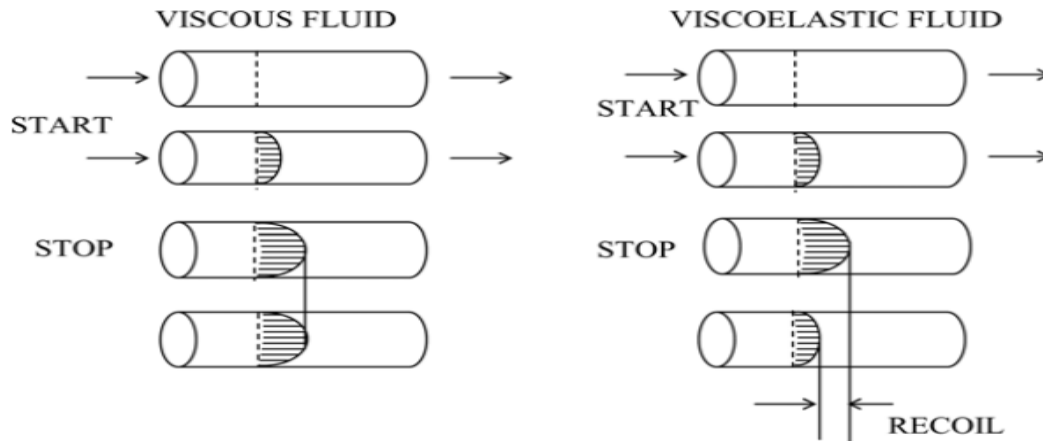


Figure 2.7 : Phénomène de recul dans les fluides visqueux et viscoélastiques [3].

Les fluides visqueux présentent généralement une viscosité alors que les solides présentent une élasticité. Certains aliments présentent à la fois des propriétés visqueuses et élastiques, ce type de matériau est connu sous le nom de matériaux viscoélastiques.

Un phénomène observé dans le matériau viscoélastique est appelé le phénomène de recul. Lorsque l'écoulement du matériau viscoélastique est arrêté, les forces de traction dans le fluide provoquent le retour des particules. Cependant, les fluides visqueux restent là où ils sont quand leur mouvement est arrêté [3]. Ce phénomène est illustré sur la figure 2.7. Les fonctions fluage et relaxation sont les fonctions essentielles en viscoélasticité linéaire. Elles sont définies de la façon suivante :

La fonction fluage

La fonction fluage est la déformation subie par le matériau lorsqu'on impose à ce dernier une contrainte d'amplitude unité au temps $t = 0$, contrainte qui est maintenue constante (figure 2.8)

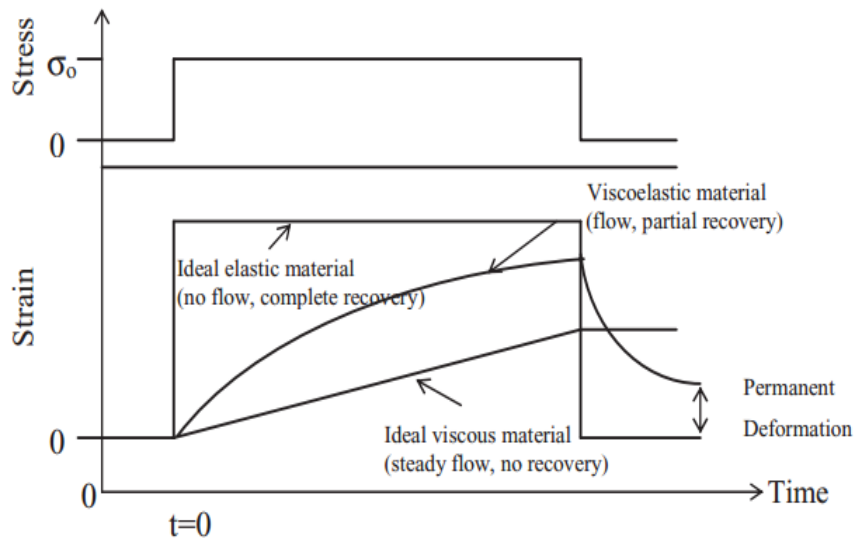


Figure 2.8 : Courbes de fluage et de recul pour les matériaux élastiques, visqueux et viscoélastiques [3].

2.2.2.3.1 La fonction relaxation

La fonction relaxation est la contrainte résultant de l'application d'une déformation d'amplitude unité à l'instant initial $t=0$, déformation qui est maintenue constante au cours du temps (figure 2.9).

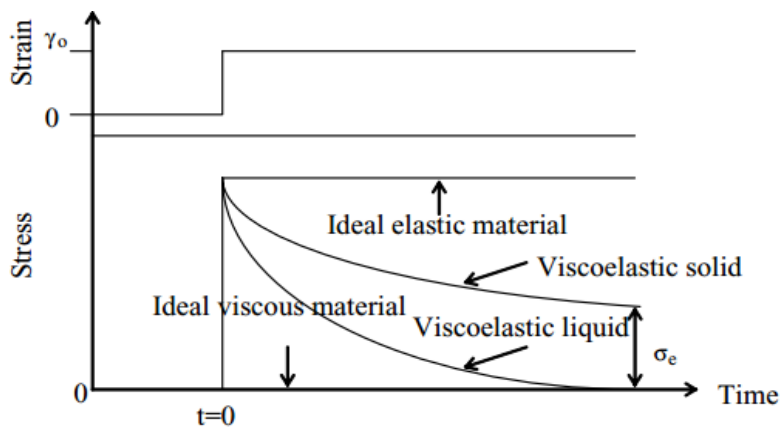


Figure 2.9 : Courbes de relaxation pour les matériaux élastiques, visqueux et viscoélastiques [3].

L'exemple typique d'aliments pour les fluides viscoélastiques est la pâte de farine de blé. La crème laitière, le mélange de crème glacée, la crème de guimauve, le fromage et la plupart des produits gélifiés sont également des aliments viscoélastiques [35].

2.3 Comportement rhéologique des fluides réels

Les principales classes de comportement d'écoulement discutées précédemment sont observées si la courbe d'écoulement est mesurée sur des gammes limitées de taux de cisaillement. Généralement, la plupart des fluides présenteront un comportement conforme à plus d'une classification d'écoulement sur une gamme de taux de cisaillement plus large.

2.4 Modèles permettant la description des écoulements

L'utilisation de modèles d'écoulement est la forme la plus fondamentale de traitement de données en rhéologie, ces modèles permettent la prédiction du comportement d'écoulement sur une gamme de taux de cisaillement ou de contraintes de cisaillement. L'applicabilité des modèles d'écoulement aux classes de comportement d'écoulement est résumée dans le diagramme suivant :

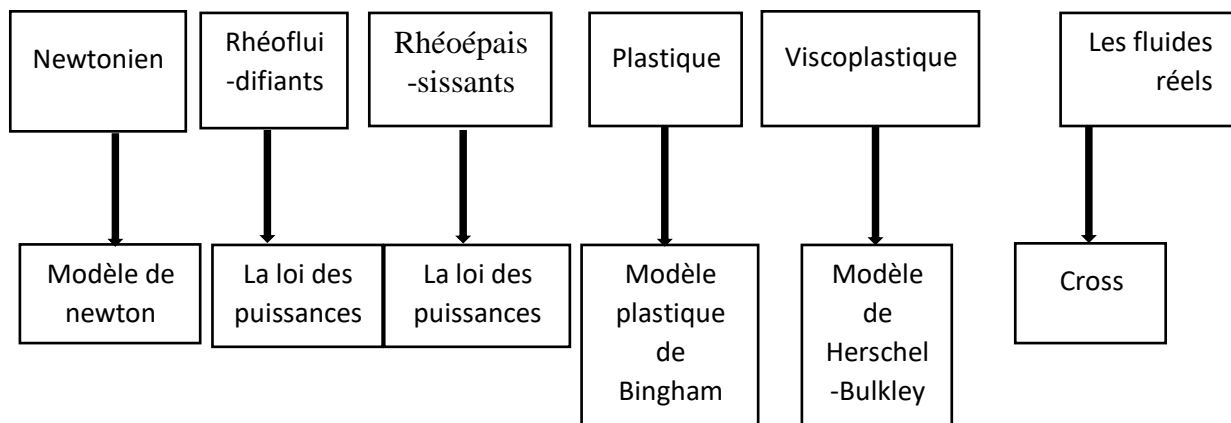


Figure 2.10 : Diagramme d'applicabilité des modèles rhéologiques couramment utilisés aux types de comportement d'écoulement [36]

2.4.1. Fluide à comportement indépendant du temps

2.4.1.1 Modèle de Newton

C'est le modèle le plus simple pour l'écoulement et aussi l'un des plus anciens datant de 1687 qui décrit un liquide visqueux idéal et qui est basé sur une relation linéaire entre la contrainte et la vitesse de cisaillement où la constante de proportionnalité est la viscosité :

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.12)$$

η : étant la viscosité newtonienne.

De plusieurs façons, cette relation ressemble à la loi d'Ohm ($V = RI$) où la contrainte est la différence de potentiel, la vitesse de déformation est le courant et la viscosité [la résistance à l'écoulement] est la résistance électrique [37].

2.4.1.2 Modèle de la loi de puissance (Power Law Model)

Puisque la plupart des fluides sont non-newtoniens, des modèles non linéaires sont nécessaires pour décrire le changement de viscosité avec la vitesse de cisaillement ou la contrainte de cisaillement. Le plus simple de ces modèles non linéaires est une loi de puissance. Ce modèle est décrit par une équation à deux paramètres [36] :

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.13)$$

Où K a les unités de Pa s^n et n l'exposant de la loi de puissance.

Cette équation décrit le comportement newtonien lorsque $n = 1$, un comportement rhéofluidifiant par cisaillement lorsque $n < 1$ ou un comportement rhéoépaississant par cisaillement lorsque $n > 1$.

Sur un graphe log-log, le modèle est représenté par une droite de pente n . Les valeurs de n vont typiquement de 0,2 à environ 1,4 [36].

➤ *Limites de la loi des puissances* [31, 38] :

Les rhéogrammes de la plupart des corps fluidifiants possèdent une ou deux régions où la viscosité apparente est indépendante de la vitesse de cisaillement. Ces deux zones de variation correspondent aux valeurs de très faibles vitesses de cisaillement (souvent inférieures à 10^{-2}s^{-1})

ou très élevées (parfois supérieures à 10^8 s^{-1}). Ces deux régions, dites première et deuxième région newtonienne, sont caractérisées par les coefficients de viscosité « newtonienne » :

$$\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta \quad (2.14)$$

$$\eta_\infty = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta \quad (2.15)$$

Il est clair que la loi des puissances rend compte de l'existence de ces deux régions newtoniennes, mais seulement de la zone intermédiaire, comme le montre la figure 2.11.

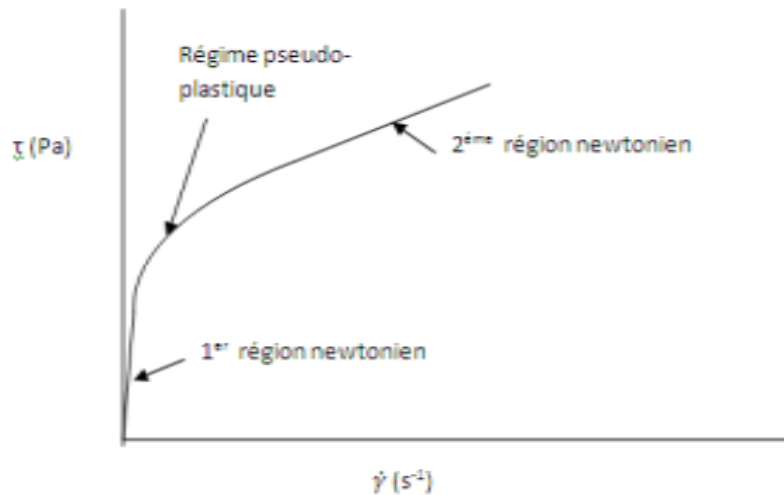


Figure 2.11 : Rhéogramme réel d'un fluide rhéofluidifiants [31]

Un niveau de complexité supplémentaire est introduit si le rhéogramme [tracé de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement] a une intersection non nulle avec l'axe des ordonnées.

Trois modèles de ce type existent, Ces modèles vont de la complexité à partir d'un modèle linéaire avec une limite d'élasticité ajoutée [Bingham] à un modèle linéaire pris comme la racine carrée [Casson] à une loi de puissance avec une limite d'élasticité ajoutée [Herschel-Bulkley].

2.4.1.3 Modèle plastique de Bingham (Bingham Plastic Model)

Ce modèle à deux paramètres [39] est décrit par la relation suivante :

$$\tau = \tau_{yB} + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

Où : τ_{yB} est la contrainte seuil « Bingham yield stress » and η_B la viscosité plastique de Bingham.

2.4.1.4 Modèle de Herschel- Bulkley

Ce modèle, également connu sous le nom de modèle plastique de Bingham généralisé, utilise une loi de puissance à trois paramètres donnés par :

$$\tau = \tau_{yHB} + K\dot{\gamma}^n \quad (2.17)$$

Où : τ_{yHB} représente la contrainte minimale qu'il faut appliquer pour obliger un corps à s'écouler (*Herschel-Bulkley yield stress*). Cette équation décrit le comportement viscoplastique lorsque $n < 1$.

Si $\tau_{yHB} = 0$, Cette équation décrit le comportement rhéofluidifiant pour $n < 1$, rhéoépaississant pour $n > 1$ et Newtonien pour $n = 1$), le modèle représente le comportement d'écoulement d'une large gamme de fluides sans être trop difficile à gérer mathématiquement [36].

2.4.1.5. Modèle de Casson

Il s'agit d'un modèle à deux paramètres [40] qui se traduit par la relation :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{yC}} + \sqrt{\eta_C \dot{\gamma}} \quad (2.18)$$

Où τ_{yC} représente la contrainte minimale qu'il faut appliquée pour obliger un corps à s'écouler (*Casson yield stress*) et η_C : la viscosité de Casson.

La linéarité est obtenue en portant $\tau^{0.5}$ en fonction de $\dot{\gamma}^{0.5}$. Ce modèle a été développé initialement pour l'étude des encres d'imprimerie, mais il est très utilisé pour l'étude des dispersions alimentaires.

2.4.1.5 Modèle de Cross

Le modèle Cross [41] est donné par :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty})}{(1 + \alpha \dot{\gamma}^m)} \quad (2.19)$$

Où η_{∞} et η_0 sont respectivement les valeurs asymptotiques de la viscosité à des taux de cisaillement très faible et très élevé.

α est une constante qui a l'unité de s^m où 'm' est un exposant.

L'effet des différentes valeurs de α , c'est-à-dire à la même valeur de η_∞ et η_0 , est montré dans la figure 2.12.

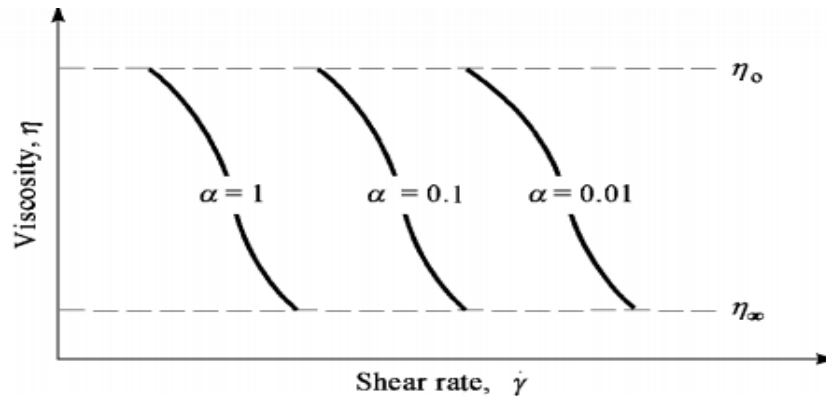


Figure 2.12: Représentation graphique (viscosité contre la vitesse de cisaillement) du modèle Cross avec différentes valeurs de α [42]

2.4.2 Fluide à comportement dépendant du temps

2.4.2.1 Modèle de WELTMAN [43]

Le modèle de WELTMAN a été utilisé pour la caractérisation des produits thixotropiques et antithixotropiques, son équation est de type :

$$\tau = A - B \log t$$

Avec τ le taux de cisaillement [Pa], t temps [s], A : la valeur de l'effort à $t=1s$, B est une constante ; pour les fluides thixotropiques, la valeur de B est négative, elle est positive pour les fluides anti-thixotropiques.

2.4.2.2 Modèled de Hann

Hahn et al. (1959) a soutenu théoriquement que la décomposition du stress des substances thixotropes devrait suivre la relation de type du premier ordre,

$$\log(\tau - \tau_e) = P - a t \quad (2.20)$$

Où τ_e est la valeur de la contrainte de cisaillement à l'équilibre qui est atteinte après un long temps de cisaillement ; P représente la contrainte de cisaillement initiale [Pa] et ' a ' indique le taux de rupture structurelle pour l'échantillon [s^{-1}].

2.4.2.3 Modèle de TIU ET BOGER [29]

Ce modèle a été élaboré par TIU et BOGER sur la base de l'étude du comportement rhéologique de la mayonnaise au moyen du modèle modifié de Herschel-BULKLEY :

$$\tau = \lambda (\tau_0 + k_H(\dot{\gamma})^{n_H}) \quad (2.21)$$

λ étant un paramètre structurel dépendant du temps dont la valeur varie de l'unité jusqu'à λ_e , k_H est l'indice de consistance, n_H l'indice d'écoulement.

La variation du paramètre structurel semble obéir à une loi de second ordre du type

$$\frac{d\lambda}{dt} = -k_1(\lambda - \lambda_e)^2 \quad (2.22)$$

k_1 est fonction de $\dot{\gamma}$ et qui est déterminé expérimentalement, la détermination de k_H et τ_0 , n'est pas facile, pour λ_e et k_1 elle requiert la connaissance des valeurs de la viscosité apparente

$$\lambda = \frac{\eta_a \dot{\gamma}}{\tau_0 + k_H \dot{\gamma}^{n_H}} \quad (2.23)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = -a_1(\eta_a - \eta_0)^2 \quad (2.24)$$

$$a_1(\dot{\gamma}) = \frac{k_1 \dot{\gamma}}{\tau_0 + k \dot{\gamma}^{n_H}} \quad (2.25)$$

TIU et BOGER ont montré que le tracé de $\frac{1}{(\eta_a - \eta_0)}$ en fonction du temps donne une courbe droite de pente a_1 ; en répétant la procédure avec d'autres valeurs, on peut obtenir la relation entre a_1 et $\dot{\gamma}$, et par suite k_1 et $\dot{\gamma}$ à partir de l'équation.

Chapitre : 3

Partie expérimentale

Chapitre 3: Partie expérimentale

3.1 Introduction

La dynamique actuelle du marché des denrées alimentaires oblige les industriels à formuler constamment de nouveaux produits. Ainsi, l'intérêt récent des consommateurs pour avoir des aliments de haute qualité a conduit à l'utilisation d'ingrédients tels que des agents de texture, ou des épaississants ou encore des gélifiants. Or, toute variation de la composition de l'aliment entraîne une modification de sa structure, de ses propriétés rhéologiques, de la stabilité et de ses caractéristiques sensorielles, notamment de la texture en bouche et de l'arôme, qui déterminent largement l'acceptabilité des produits. La formulation de nouveaux aliments reste encore empirique et, de ce fait, est longue et coûteuse. Dans ce contexte, une meilleure connaissance des mécanismes et des caractéristiques physico-chimiques et sensoriels est recherchée pour tendre vers une formulation raisonnée de ces produits.

La partie pratique de notre travail se décline en deux parties :

- L'étude du comportement rhéologique de deux substances (yaourt et mayonnaise).
- L'étude de la structure de la mayonnaise qui appartient à un type d'émulsion alimentaire importante (émulsion huile dans l'eau).

Ces caractérisations rhéologiques se limitent à la construction, point par point, des rhéogramme qui définissent le type de comportement. En particulier, nous chercherons à trouver le type de modèle rhéologique qui correspond le plus au tracé du rhéogramme obtenu expérimentalement.

3.2 Etude du comportement rhéologique

La viscosité est un paramètre devant être particulièrement contrôlé dans la conception d'un produit alimentaire. Il s'agit d'une propriété qui influence directement l'acceptabilité de la formulation du produit, sa facilité de fabrication, la conception de l'emballage et d'une multitude d'autres attributs appréciés par le consommateur. Il est donc fondamental d'effectuer des mesures viscosimétriques dans le domaine précis des taux de cisaillement rencontrés dans la pratique [44].

Pour une mesure viscosimétrique, la sélection d'un outil de mesure approprié dépend à la fois de la nature du produit étudié et de l'objectif de la mesure. Ainsi la composition du produit

et le mode d'extraction du produit de son emballage sont des facteurs importants pour la sélection de la méthode d'essai rhéologique.

De ce fait, cette partie vise à atteindre deux objectifs principaux :

Le premier objectif est de procéder à des mesures des propriétés rhéologiques de quelques produits alimentaires afin d'établir leur rhéogrammes (taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement) qui les caractérisent et d'en déduire les modèles mathématiques qui les décrivent ;

Le deuxième objectif est d'évaluer l'étendue du domaine de contraintes pouvant être obtenues avec notre appareil et donc ses possibilités d'utilisation. En effet le rhéomètre utilisé n'est qu'un appareil de contrôle de marque BROOKFIELD qui sera décrit plus bas.

3.2.1 Caractérisation du comportement rhéologique d'une substance

Pour caractériser le comportement rhéologique d'un matériau, il est nécessaire de déterminer son rhéogramme $(\tau, \dot{\gamma})$ et cela à partir des données et mesures expérimentales fournies par le rhéomètre. Dans la catégorie des rhéomètres rotatifs cylindriques, on rencontre indifféremment les deux procédures expérimentales suivantes :

Soit on impose au cylindre intérieur un couple de rotation connu M , tout en maintenant le cylindre extérieur fixe, et l'on mesure sa vitesse angulaire ω_0 .

Soit on impose au cylindre intérieur une vitesse angulaire de rotation ω_0 connue, et l'on mesure le couple résistant M qu'il faut appliquer au cylindre intérieur pour qu'il demeure immobile.

Dans les deux cas, les mesures expérimentales dont on dispose sont, par conséquent, la vitesse de rotation du cylindre intérieur ω_0 et le couple de rotation imposé M . Dès lors que ces valeurs expérimentales sont connues, on peut aisément caractériser la nature du fluide étudié.

3.2.2 Présentation des produits

Dans le présent travail, deux produits alimentaires : la mayonnaise et le yaourt sont étudiés, il s'agit de produits du commerce de consommation courante : La raison qui explique le choix de ces deux types d'aliments est qu'ils sont représentatifs de deux catégories différentes de produits : les émulsions représentées par la mayonnaise et les gels par le yaourt.

Plusieurs échantillons de yaourts brassés et de mayonnaise disponibles dans le marché et produits par deux fabricants différents ont été obtenus auprès d'un supermarché local. Les conteneurs de ventes arrivent dans les supermarchés avec une durée de conservation du yaourt d'environ 4 à 5 semaines et 1 ans pour la mayonnaise (identifiés par leurs dates d'expiration sur les boites). En ce qui concerne le yaourt, tous les échantillons ont été obtenus 3 à 4 semaines avant leur date de péremption.

Le tableau suivant donne les ingrédients utilisés pour la fabrication de ces produits

Tableau 3.1 : Les ingrédients des échantillons de mayonnaise et de yaourt.

Produits	Ingrédients
Mayonnaise	<ul style="list-style-type: none"> - Huile de tournesol - Eau - Jaune d'œuf - Sel - Sucre - Arome - Moutarde - Additifs alimentaires : - Gomme xanthane (stabilisant) - Gomme de guar (stabilisant) - Acide citrique 4 - SIN202(conservateur) - B carotène (colorant)
Yaourt brassé naturel	<ul style="list-style-type: none"> - Lait fermenté - levure - Matieres grasses.

3.2.3 Présentation de l'appareil utilisé

Afin d'étudier le comportement rhéologique des deux produits cités précédemment, nous avons utilisé un rhéomètre de type BROOKFIELD LV-I+ (figure 3.1) ayant pour accessoires quatre éléments mobiles : S61, S62, S63 et S64 (« S » pour Spindle en anglais) de formes

différentes, ces mobiles sont fabriqués à partir d'acier inoxydable série 300 pour avoir une résistance maximale contre la corrosion.

Les caractéristiques de chaque mobile sont données dans l'annexe 1. Pour chacun de ces mobiles, l'appareil peut effectuer des mesures de viscosité dans un intervalle déterminé selon la forme du mobile. L'appareil électronique programmable permet, pour chaque mobile fixé, de procéder directement à son enregistrement, l'écran affiche alors le code de l'élément en cours et le programme de mesure en tient compte car les résultats des mesures dépendent de la géométrie du mobile.



Figure 3.1 : Rhéomètre BROOKFIELD LV-I+ utilisé

3.2.4 Principe de fonctionnement d'un rhéomètre rotatif

Le rhéomètre rotatif est la classe de rhéomètres la plus fréquemment utilisée et cela d'autant plus que le fonctionnement de tels rhéomètres est le plus souvent automatisé.

Le viscosimètre Brookfield DV-I + mesure la viscosité (la résistance d'un fluide à l'écoulement) du fluide à des vitesses de cisaillement données. Il permet aussi de mesurer le couple (la torsion) nécessaire pour faire tourner un mobile immergé (Spindle) dans un fluide.

La substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux, de rayons R_1 et R_2 , et de hauteur h . Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en

communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω_0 , l'autre cylindre demeurant immobile. Notons que l'on rencontre des rhéomètres cylindriques dans lesquels le cylindre mobile est intérieur ou au contraire extérieur. Pour ce qui est de notre appareil, c'est un rhéomètre avec cylindre extérieur fixe et cylindre intérieur mobile.

La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes (figure 3.2), variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre extérieur fixe) à ω_0 (pour la couche en contact avec le cylindre intérieur mobile). Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement γ et une contrainte de cisaillement τ .

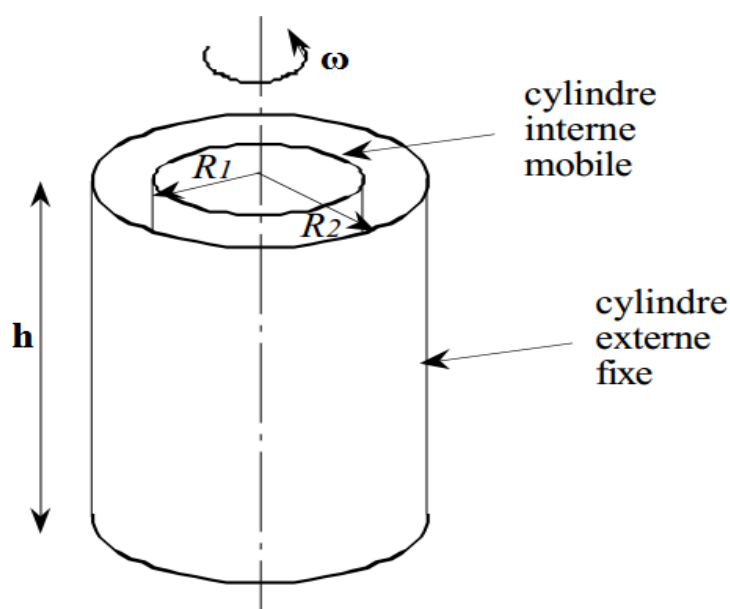


Figure 3.2 : Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'un rhéomètre rotatif

Le principe de mesure de la viscosité est d'appliquer une force de mouvement à l'échantillon de fluide en mettant en rotation (cisaillement), à vitesse constante, un mobile de taille fixe. La résistance au mouvement de rotation du mobile est enregistrée à l'aide d'un ressort spiralé interne, puis convertie en unité viscosimétriques. Le domaine de mesure du viscosimètre dépend de la vitesse de rotation, des dimensions et de la forme du mobile immergé dans le fluide (spindle), du récipient dans lequel s'effectue les rotations ainsi que du ressort.

Ce viscosimètre mesure la force de torsion nécessaire à la rotation du mobile immergé dans le fluide. Le mobile fonctionne grâce à un ressort calibré contenu dans le moteur (voir l'annexe). La résistance du flux (indiquée par le % de torsion du ressort) est proportionnelle à la vitesse et à la grandeur du mobile.

Sur l'écran du rhéomètre sont affichés :

- La viscosité : L'appareil est conçu pour la mesure des viscosités en centipoises allant de 50 à 2000000 cP comme le montre le tableau de l'annexe 1 [30].
- La vitesse de rotation : Les vitesses disponibles sont en tours par minute : 60, 30, 12, 6, 3, 1, 1.5, 0.6, 0.3 et 100, 50, 20, 10, 5, 4, 2.5, 2, 1, 0.5.
- Le type du mobile utilisé : de S61 à S64 (voir Tableau en annexe 2).
- La torsion : l'affichage de la torsion mesurée est donné en % par rapport à la torsion maximale qui est de $673,7 \cdot 10^{-7}$ N.m.
- Si la torsion dépasse la valeur limite (100%) ou si le mobile utilisé produit une torsion qui est inférieur à 10%, un message d'erreur sur l'appareil est affiché.

3.2.5 Protocole expérimental

Quel que soit le type d'instrument utilisé, en vue d'obtenir des bons résultats, quelques recommandations doivent être suivies pour une meilleure exploitation de l'appareil :

Préparation de l'échantillon

Après l'homogénéisation des deux échantillons, un récipient cylindrique de rayon de 1,5 cm est rempli chaque fois par l'échantillon étudiée. L'échantillon de fluide doit être exempt d'air emprisonné. L'air a été retiré en utilisant avec précaution une spatule.

Puisque la viscosité dépend de la température, l'échantillon doit être aussi à une température constante et uniforme. Cela a été vérifié en mesurant la température à plusieurs endroits différents dans le récipient. L'échantillon a été laissé pendant quelque minute afin d'atteindre la température ambiante en immergeant un thermomètre dans le récipient.

Le mobile doit avoir la même température que l'échantillon de fluide avant de commencer l'expérience.

Mise en route de l'appareil

- L'orientation du dispositif est vérifiée à l'aide du niveau à bulle, la rectifier si nécessaire ;

- L'appareil est allumé (bouton de marche-arrêt à l'arrière), les indications affichées sont suivies étape par étape.
- Le mobile ensuite est fixé délicatement (ce système d'accrochage est la partie fragile du dispositif) au rhéomètre en le vissant sur une visse d'accrochage.
- Le mobile est ensuite immergé dans le centre du récipient contenant le fluide à l'aide d'un support élévateur.

La mise en marche

- Le moteur est mis en marche en le laissant tourner jusqu'à obtention d'une lecture constante. On commence toujours par les vitesses faibles.
- A la fin de chaque expérience, le mobile est démonté délicatement. L'ensemble des accessoires est nettoyé et rangé.

Remarque

Lors de la manipulation du yaourt, nous avons constaté que la lecture soit de la viscosité, soit du taux de cisaillement ne parvient pas à l'équilibre mais continue à osciller. Cela est généralement dû à la présence d'un composant élastique et visqueux dans le fluide [30]. Donc nous avons décidé de prendre pour chaque lecture une valeur moyenne entre la valeur maximale et minimale.

3.2.6 Méthode de calcul

Dans cette section, nous présentons les équations qui définissent les paramètres de fonctionnement du rhéomètre et les formules simplifiées pour obtenir la vitesse de cisaillement et la valeur de la contrainte de cisaillement. Celles-ci dépendent du type de géométrie du mobile (spindle). Pour un mobile cylindrique, la vitesse de cisaillement (shear rate) est définie par la formule :

$$\dot{\gamma} = \frac{2 R_c^2 R_b^2 \omega}{\chi^2 (R_c^2 - R_b^2)} \quad (3.1)$$

Avec :

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1})

ω : vitesse angulaire $\omega = \frac{2\pi N}{60}$

N : nombre de tours par minute

R_c : rayon du contenant

R_b : rayon de l'élément choisi

χ: La position à laquelle on désire calculer la viscosité $\frac{R_c + R_b}{2}$

Le taux de cisaillement (shear stress) est exprimé par la formule :

$$\tau = \frac{M}{2 \pi R_b^2 L} \quad (3.2)$$

τ: Taux de cisaillement (dyne /cm²)

M : moment de cisaillement = %*673.7 N.m

L : hauteur de l'élément

En utilisant les équations (3.1) et (3.2) et en se basant sur les caractéristiques géométriques des caractéristiques géométriques des différents Spindles données dans l'annexe 2, on trouve :

Tableau 3.2:Equation de calcul des paramètres d'écoulements

Mobile	τ(dyne/cm ²)	γ̇ (s ⁻¹)
Spindle LV2 (S61)	18.57 *%	0.136*N
Spindle LV2 (S62)	178.5 *%	0.134*N
Spindle LV2 (S63)	255.81 *%	0.02*N
Spindle LV2 (S64)	1273.18 *%	0.007*N

3.3 Les résultats expérimentaux

Les valeurs données dans les tableaux suivants sont les moyennes géométriques des valeurs des trois essais.

3.3.1 Le yaourt

Les résultats des mesures de l'échantillon de la mayonnaise sont donnés dans le tableau 3.3 suivant :

Tableau 3.3 : Résultats expérimentaux de l'échantillon de yaourt

Taux de torsion (%)	11.77	15.07	18.17	20.03	28.87	32.00	45.50
Vitesse de rotation (tour/minute)	5	10	20	30	50	60	100
Viscosité (cP)	2832	1811	1090	801	696	638	544

A l'aide des expressions mathématiques mentionnées précédemment en prenant en considération le type du mobile utilisé (S63) dans cette expérience on a fait le calcul de la contrainte et de la vitesse de cisaillement, Ces calculs ainsi que les dimensions du mobile utilisé sont rapportés en annexe 2, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 3.4: Résultats des calculs d'échantillon de yaourt

Contrainte de cisaillement (dyne/cm ²)	0.1	0.2	0.4	0.6	1	1.2	2
Vitesse de cisaillement (s ⁻¹)	3018.56	3837.15	4604.58	5218.52	7418.49	8185.92	11639.35

Ces données permettent de tracer deux courbes : la viscosité en fonction de vitesse de cisaillement (fig 3.3) et la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (rhéogramme, fig 3.4) .

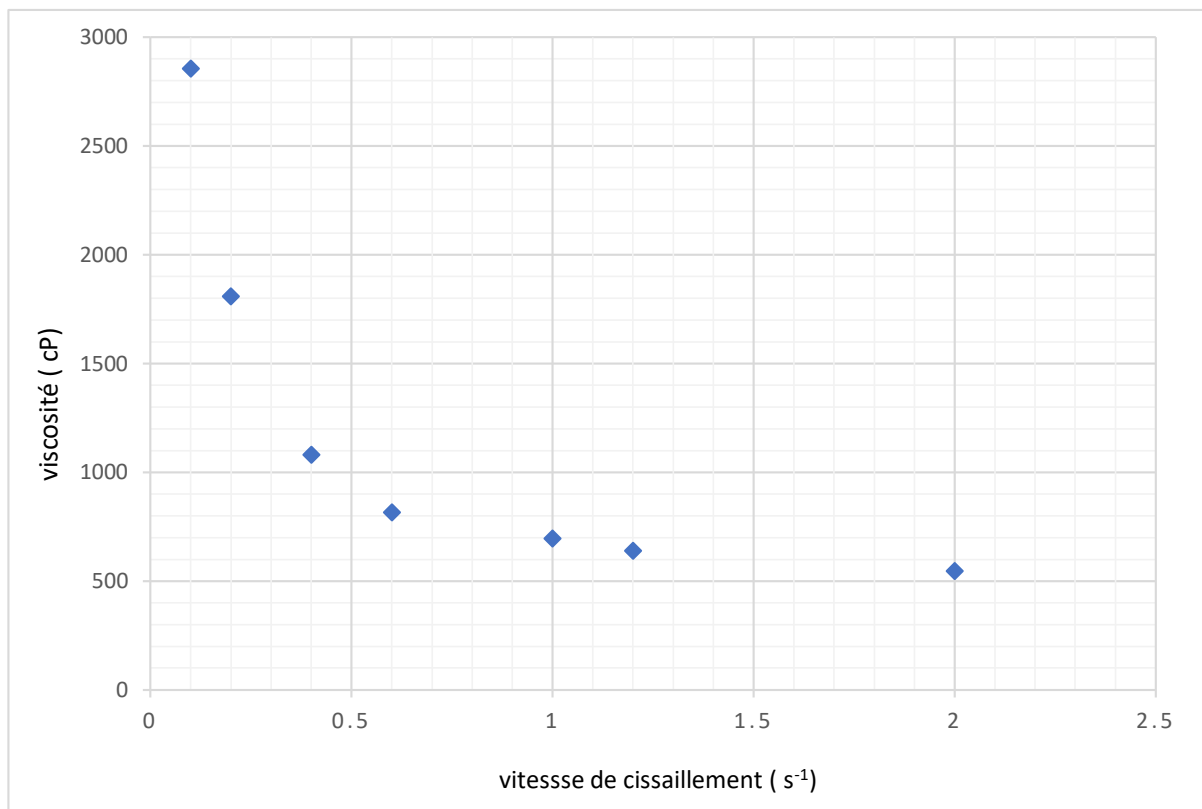


Figure 3.3 : Variation de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement du yaourt.

Discussion

La courbe de variation de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement (Fig.3.3) montre qu'il y a une décroissance de la viscosité en fonction de vitesse de cisaillement le long de l'intervalle de mesure, Ceci correspond au comportement attendu d'une structure en gel solide, où une perturbation adéquate de la structure est nécessaire [30]. Lors de l'augmentation du gradient de vitesse, les particules en suspension s'orientent dans le sens de l'écoulement, permettant un meilleur glissement des particules, provoquant ainsi une diminution de la viscosité. Ce comportement est caractéristique des fluides rhéofluidifiants.

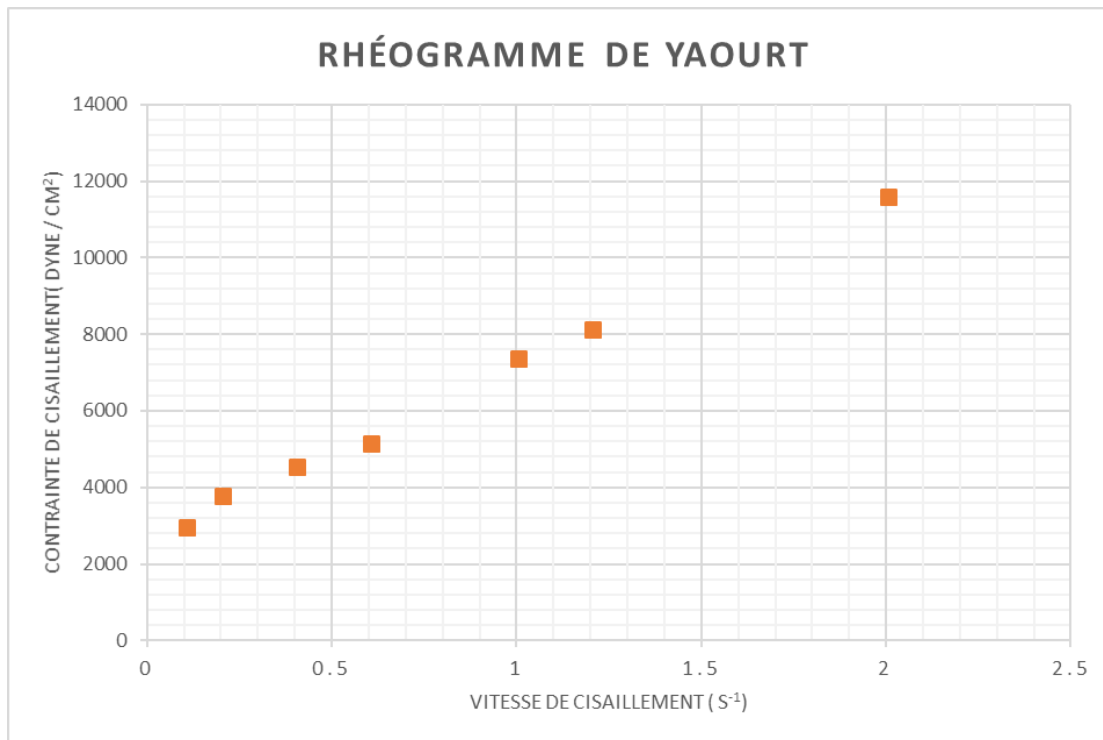


Figure 3.4 : Rhéogramme d'un échantillon de yaourt brassé.

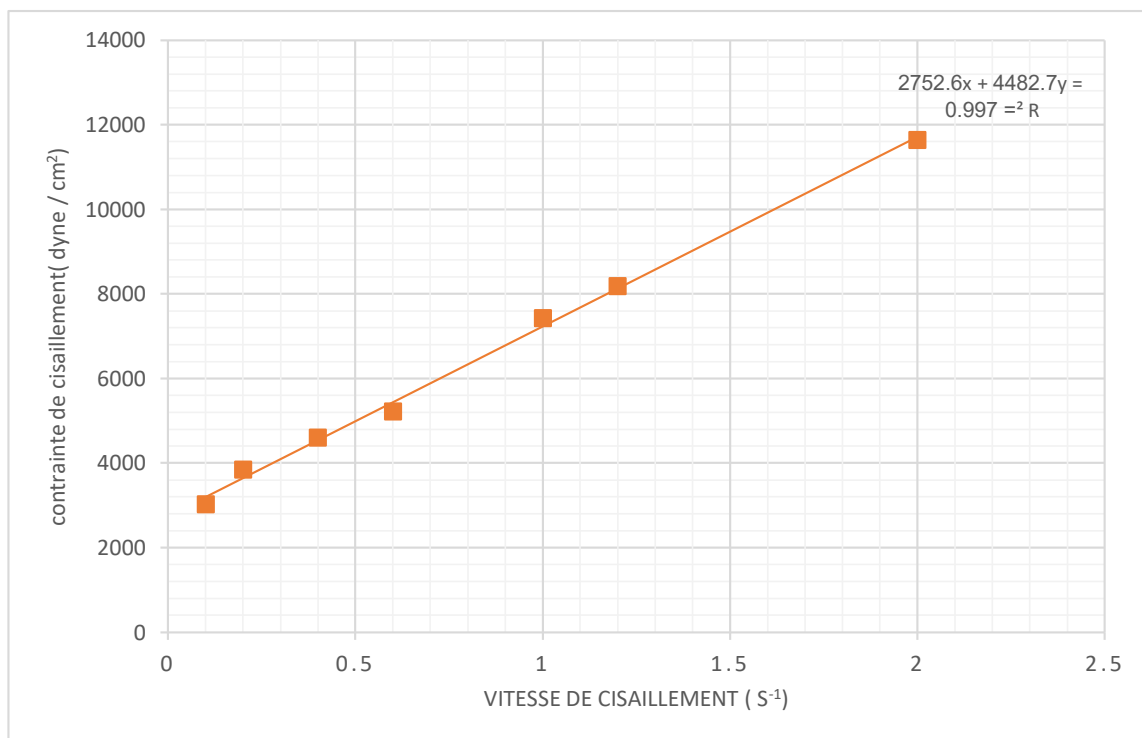


Figure 3.5 : Estimation du modèle d'écoulement du yaourt brassé

Discussion

D'après la forme de la courbe obtenue, nous pouvons assimiler le comportement rhéologique du yaourt brassé par le modèle de Bingham, Ce modèle à deux paramètres est décrit par la relation suivante :

$$\tau = \tau_{yB} + \eta_B \dot{\gamma}$$

En faisant l'analogie avec l'équation de la courbe de tendance, on évalue les deux paramètres

$$\tau_{yB} = 2752.6 \text{ dyne/cm}^2$$

$$\eta_B = 4482.7 \text{ cP}$$

τ_{yB} est la contrainte seuil « Bingham yield stress » et η_B est la viscosité plastique de Bingham.

Le rhéogramme nous permet de déceler un seuil de contrainte au-dessous de laquelle, le fluide ne subit aucune déformation

3.3.2 La mayonnaise

Les résultats des mesures rhéologiques sont donnés dans le tableau 3.5 :

Tableau 3.5 : Résultat expérimental de l'échantillon de yaourt

Taux de torsion (%)	40.07	45.20	52.67	59.07	65.17	73.87	66.03	78.60	90.87
Vitesse de rotation(tour/minute)	0.30	0.60	1.50	3.00	6.00	12.00	10.00	20.00	30.00
Viscosité (cP)	711333	452000	210666	118000	65167	36883	39613	23560	18140

A l'aide des expressions mathématiques mentionnées précédemment et en prenant en considération du mobile utilisé (S63) dans cette expérience on procède au calcul de la contrainte

et de la vitesse de cisaillement. Ces calculs et conversions en fonction des dimensions du mobile utilisé sont rapportés dans l'annexe 2. Les résultats sont consignés dans le tableau 3.6 suivant :

Tableau 3.6 : Résultat des calculs d'échantillon de mayonnaise

Vitesse de cisaillement (s^{-1})	0.0021	0.0042	0.0105	0.0210	0.0420	0.0840	0.0700	0.1400	0.2100
Contrainte de cisaillement (dyne / cm^2)	51012	57548	67054	75202	82969	94046	84072	100072	115690

Ces données permettent de tracer deux courbes : viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement (fig. 3.6) et contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (fig 3.7).

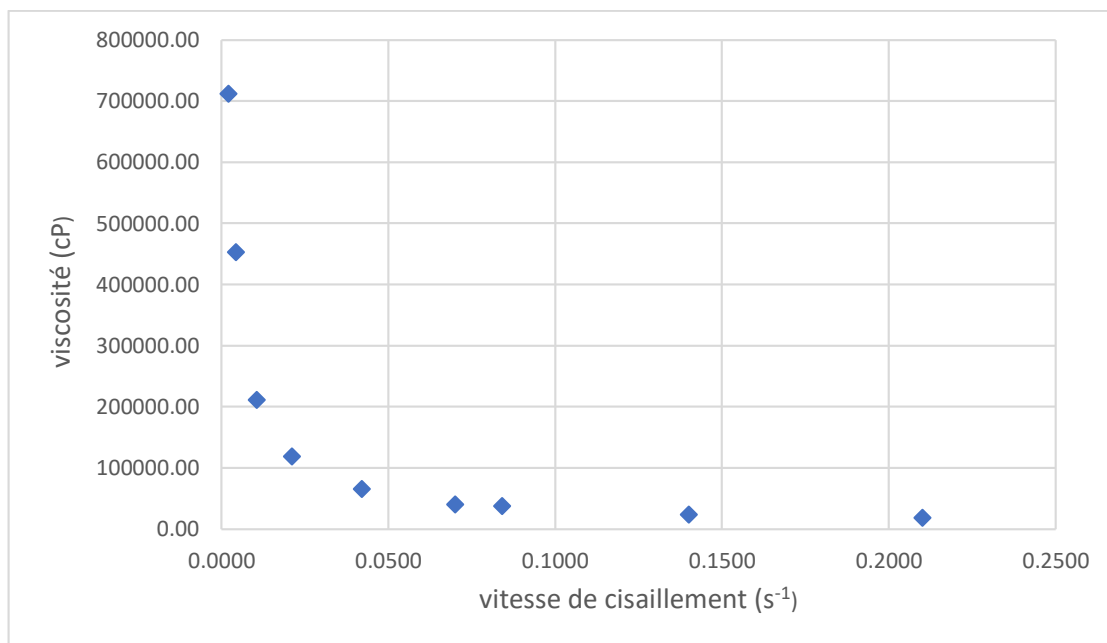


Figure 3.6 : Variation de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement du yaourt

Discussion

La figure ci-dessus montre une décroissance de la viscosité lorsque la vitesse de cisaillement augmente, ce phénomène résulte de l'augmentation de la contrainte de cisaillement : les forces hydrodynamiques provoquent la déformation des agrégats et finalement leur rupture, ce qui entraîne une réduction de la viscosité.

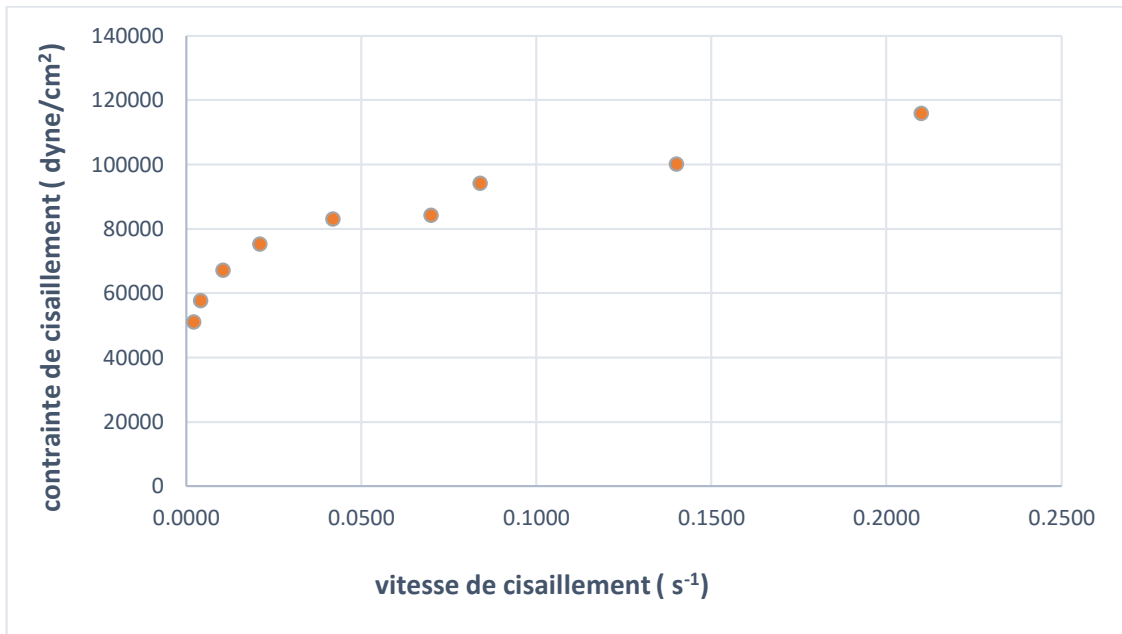


Figure.3.7 : Rhéogramme d'un échantillon de mayonnaise

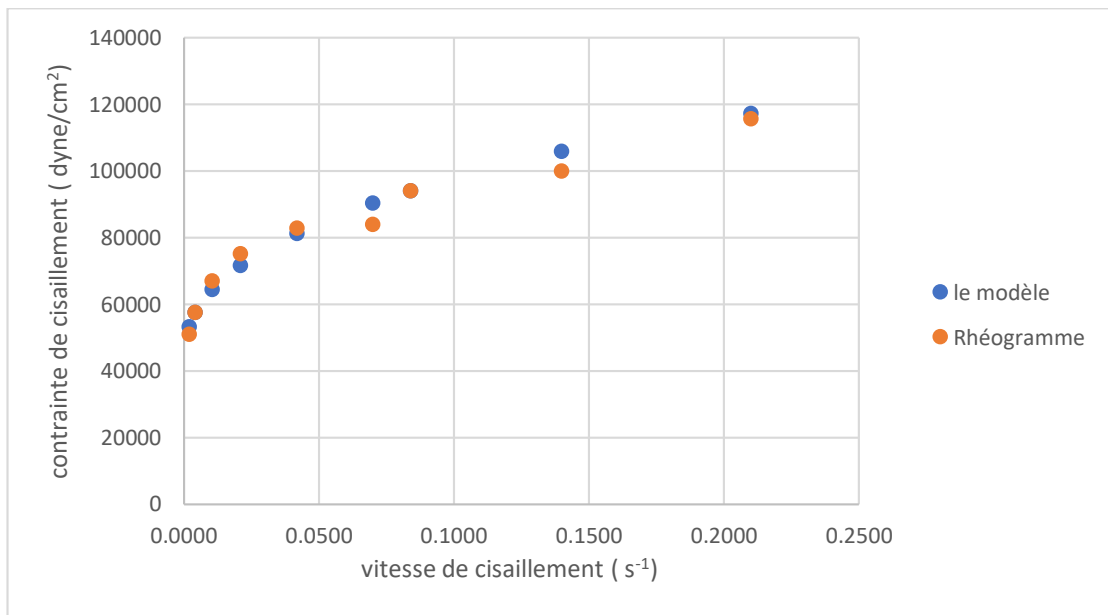


Figure 3.8 : Estimation du modèle d'écoulement de la mayonnaise

Discussion

Nous estimons le modèle correspondant au comportement rhéologique de l'échantillon de mayonnaise à partir de la courbe de tendance du rhéogramme qui a pour équation :

$$\tau = 42000 + 141329 \dot{\gamma}^{0.4033}$$

Comme nous l'avons mentionné dans la partie théorique, la loi de comportement la plus communément observée dans les mayonnaises lorsque la contrainte est supérieure à la contrainte seuil est la loi de Herschel-Bulkley qui s'écrit :

$$\tau = \tau_{yHB} + K\dot{\gamma}^n$$

Où τ_{yHB} représente la contrainte minimale (contrainte seuil) qu'il faut appliquer pour obliger la substance à s'écouler (Herschel-Bulkley yield stress).

En faisant l'analogie avec l'équation de la courbe de tendance, on évalue les deux paramètres

$$\tau_{yHB} = 42000 \text{ dyne/cm}^2$$

$$K = 141329 \text{ s}^{0.4033}$$

$$n = 0.4033$$

Comme l'exposant « n » de la vitesse de cisaillement est inférieur à 1 le modèle décrit le comportement viscoplastique.

3.4 L'étude de la structure de la mayonnaise

Les études de stabilité des émulsions constituent une étape clé lors du développement et de formulation de nouveaux produits ou compléments alimentaires. Elles garantissent que le produit formulé répond aux spécifications définies, dans les conditions de stockage étudiées et durant toute sa durée de vie.

Nous n'avons pas effectué d'étude de stabilité de l'échantillon de mayonnaise étudié, ce qui demanderait des mesures échelonnées sur plusieurs mois. En revanche, nous avons l'un des paramètres les plus importants pour la stabilité d'une émulsion, celui de la taille de ses particules.

Mesure de la taille des particules

La méthode utilisée repose sur l'observation au microscope. Le microscope est muni d'une caméra d'acquisition d'image que l'on peut relier à un PC via une connexion usb. Un logiciel (IS capture) permet d'acquérir les images du microscope et de faire des mesures des dimensions des objets capturés.

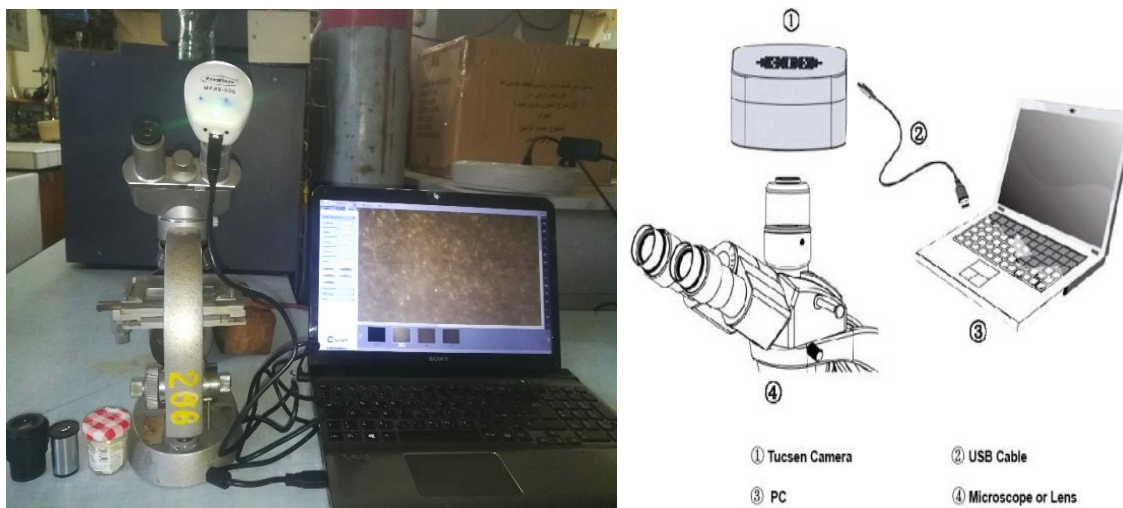


Figure 3.9 : L'appareillage utilisé pour la mesure des tailles des particules

La distribution des tailles des particule et leur monodispersion permet d'apprécier la stabilité relative de l'échantillon. Une émulsion présentant des tailles de particules uniformes sera plus stable qu'une émulsion présentant des tailles de particules très variables. Dans ce dernier cas, les phénomènes de murissement d'Ostwald conduisent tôt ou tard à la coalescence des gouttelettes.

3.4.1 Présentation du programme IS capture

ISCapture est un logiciel professionnel d'acquisition d'images, qui intègre également des outils de traitement et de gestion des images. Ses interfaces très conviviales permettent à l'utilisateur de maîtriser le logiciel très facilement.

ISCapture (abrégé par "ISC") est essentiellement utilisé pour l'acquisition d'images. Il propose aussi des fonctions de navigation dans les informations de base des images ainsi que des fonctions classiques de traitement des images. Avec ce

logiciel, l'utilisateur final peut facilement accéder aux paramètres de réglages et à un aperçu des images obtenues.

3.4.2 Description de la caméra

Il s'agit d'une caméra optique de la série MA800-500 à haute résolution 2592 X 1944 (5 Mégapixels), Cet appareil numérique combiné avec un oculaire 10X intégré permet à l'utilisateur de prévisualiser des images ou des vidéos numériques en couleur directement à partir de son microscope sur un ordinateur via le port USB. Cette caméra utilise un logiciel d'imagerie numérique (IS capture) compatible avec les différents systèmes d'exploitation (exemples : Windows) et permet de visualiser, éditer et sauvegarder des images et des vidéos.

3.4.3 Description du microscope

Un microscope est un instrument qui grossit une image pour voir de petites structures en détail. Bien qu'ils existent en différentes tailles, le microscope utilisé pour réaliser notre manipulation est celui de laboratoire. Il s'agit d'un microscope photonique de marque Hertel et Ressus Optic-Kassel 55976 (figure 3.10) qui permet d'obtenir une image agrandie de l'objet observé.

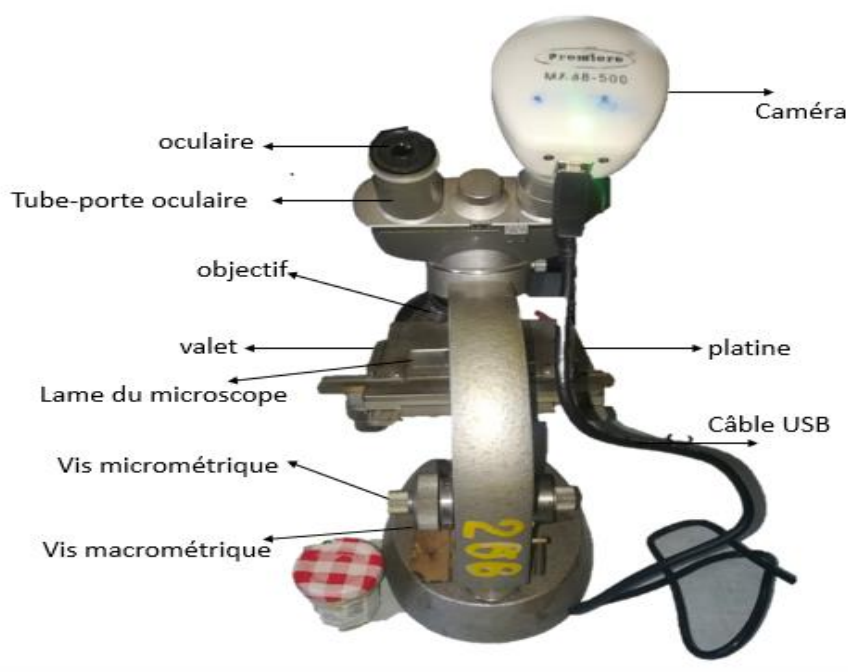


Figure 3.10 : Microscope optique couplé à une caméra d'acquisition d'images

3.4.4 Procédure et démarche suivie

Afin d'avoir une meilleure image, nous avons suivi le protocole suivant :

Etape 1 : Installation du microscope :

- Le placement du microscope a été faite sur une table propre et plane à côté d'une prise électrique ;

Etape 02 : la préparation des lames du microscopes :

- Avant de commencer, les mains doivent être lavées, et l'espace de travail dénué de saleté et de particules polluantes afin d'éviter de contaminer l'échantillon. On dépose une petite goutte de mayonnaise sur une lame propre.
- Une lamelle est ensuite placée suivant un angle de 45 degrés par-dessus la première et laissez-la tomber doucement pour recouvrir l'échantillon.
- Lame et lamelle sont ensuite placées doucement entre les deux valets (en métal) du microscope en les tenant uniquement sur les côtés pour ne pas les salir ;
- La source de la lumière est ensuite allumée.
- Si on ne voit aucune lumière, on ajuste le diaphragme jusqu'à ce qu'il soit complètement ouvert. Le diaphragme tourne grâce à un levier ou une vis qui permet de modifier son diamètre d'ouverture et d'augmenter ou de réduire la quantité de lumière qui passe à travers.

Etape 03 : utilisation du microscope

- Ajustez les oculaires pour obtenir le bon espacement entre les yeux, on doit voir un seul cercle de lumière quand on regarde à travers les 2 oculaires ;
- On règle le diaphragme à son ouverture la plus large. Le diaphragme nous permet de modifier la quantité de lumière qui éclaire les lames. Pour commencer la mise au point de l'échantillon, on doit éclairer au maximum les lame,
- On ajuste le diaphragme en réduisant l'ouverture jusqu'à l'obtention d'un éclairage suffisant de l'échantillon ;
- On effectue une mise au point en règle les vis d'ajustement jusqu'à ce qu'on puisse voire une image nette et bien détaillée de l'échantillon
- Une fois une image correcte obtenue, on place la caméra liée à son oculaire dans le tube- porte oculaire du microscope ;

- Finalement, on insère le câble USB liée à la caméra dans l'un des ports USB du PC

3.4.5 Analyse des résultats obtenus

Le démarrage du programme IS capture permet l'apparition d'une image en directe sur l'interface du programme comme il est montré sur la figure suivante :

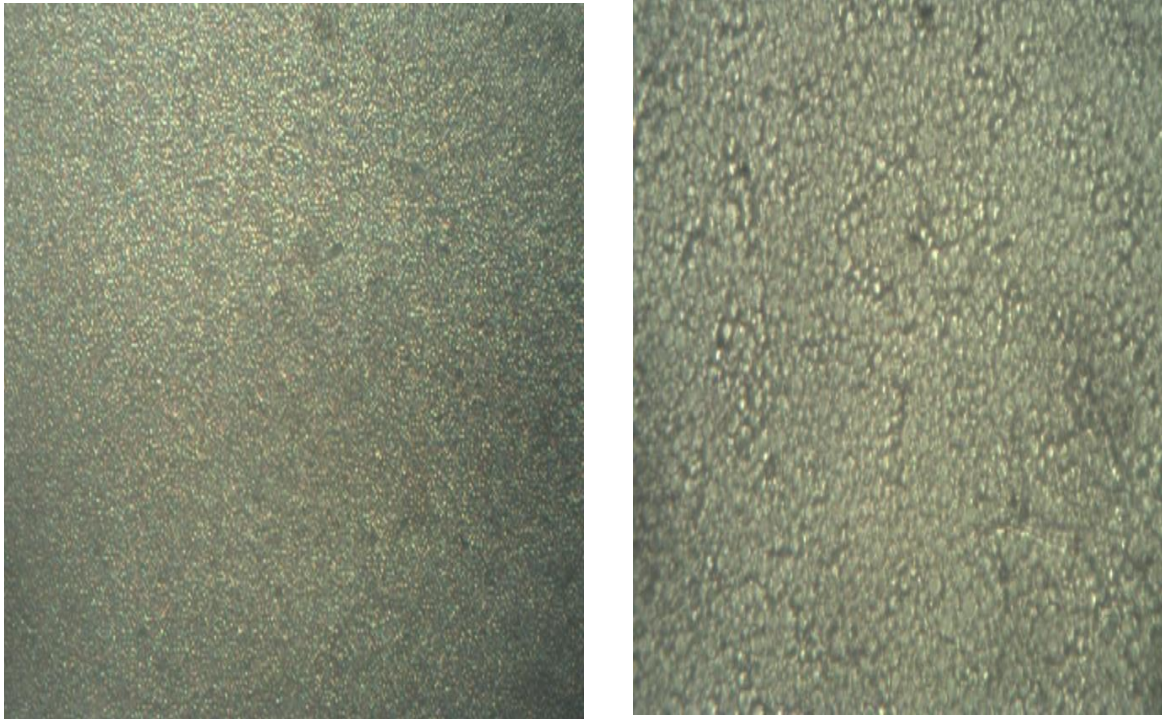


Figure 3.11 : Image agrandie d'un échantillon de mayonnaise obtenue à l'aide d'un microscope optique en utilisant deux objectifs différents (x10 et x 40)

Afin de pouvoir mesurer les tailles des particules, nous procédons à une phase de calibration : à la place de l'échantillon, on insère sous l'objectif du microscope une lame comportant une échelle graduée au centième de millimètre (micromètre) pour avoir une image contenant un calibrage bien adapté pour faire nos mesures, nous avons obtenue l'image représentée par la figure :

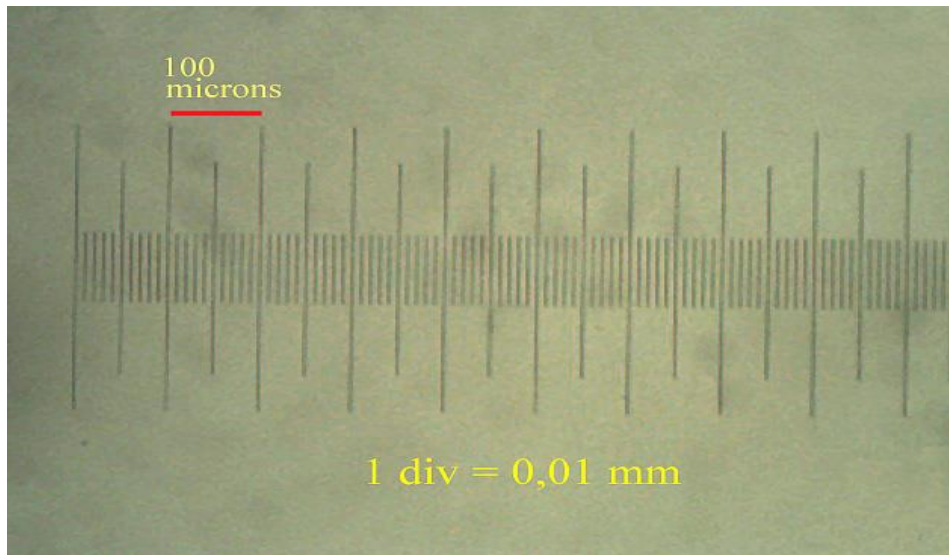


Figure 3.12 : Image du micromètre agrandie sous le microscope

Remarque

Afin d'éviter des mesures erronées, l'image de calibrage et celle de l'échantillon de la mayonnaise sont prises à la même résolution.

Les deux images de la figure 3.11, montrent des particules sous forme sphériques réparties régulièrement dans toute l'espace du champ de vision exploré. Dans le cas de la mayonnaise, il s'agit des gouttelettes d'huile (phase discontinue) dispersées dans l'eau (phase continue). Ce type de répartition nous donne une première indication sur la stabilité de l'émulsion, puisque comme nous l'avons mentionné plus haut, l'un des facteurs les plus importants affectant la stabilité de l'émulsion est la taille ou plus exactement la distribution des tailles des gouttelettes, plus les tailles sont petites et la répartition des particules serrée, plus l'émulsion est stable.

Le traitement de l'image à l'aide du logiciel IS capture et les mesures après étalonnage nous a permis d'évaluer les tailles de particules qui sont de l'ordre de 1 à 3 micromètres. Comme on peut le voir sur la figure 3.12, les particules ont presque la même taille, cela empêche l'apparition du phénomène de mûrissement d'Oswald [9] qui est induit par la différence de tailles des gouttelettes (fusion de gouttelettes entre elles : deux gouttes se rencontrent et fusionnent pour donner une goutte plus importante) conduisant ainsi à la déstabilisation du système.

D'un point de vue macroscopique, l'émulsion a un aspect homogène alors qu'elle est microscopiquement hétérogène (figure 3.13). La mayonnaise est une émulsion d'huile dans l'eau, nous savons que lorsqu'on mélange de l'huile et de l'eau et que l'on arrête l'agitation, les deux phases se séparent spontanément. Les gouttelettes d'huile migrent, fusionnent et

retournent à la surface de l'eau pour se reconstituer en phase au-dessus de l'eau (figure 3.13). Ce sont les différences de densité qui expliquent cela. On peut se demander alors par quel mécanisme l'eau et l'huile restent-elles mélangées dans la mayonnaise ? et d'où vient la stabilité des films liquides qui séparent les gouttelettes de l'huile ?

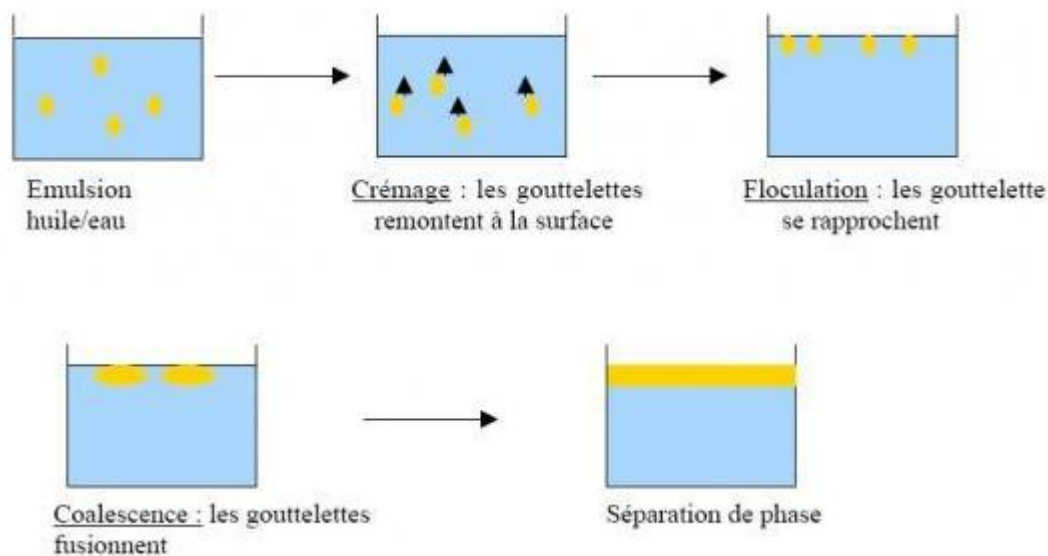


Figure 3.13 : Comportement d'un mélange huile/eau en l'absence d'agent émulsifiant

3.4.5.1 Explication à l'échelle moléculaire

Une molécule d'eau est formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. C'est une molécule "polaire" (charges positives et négatives qui se compensent).

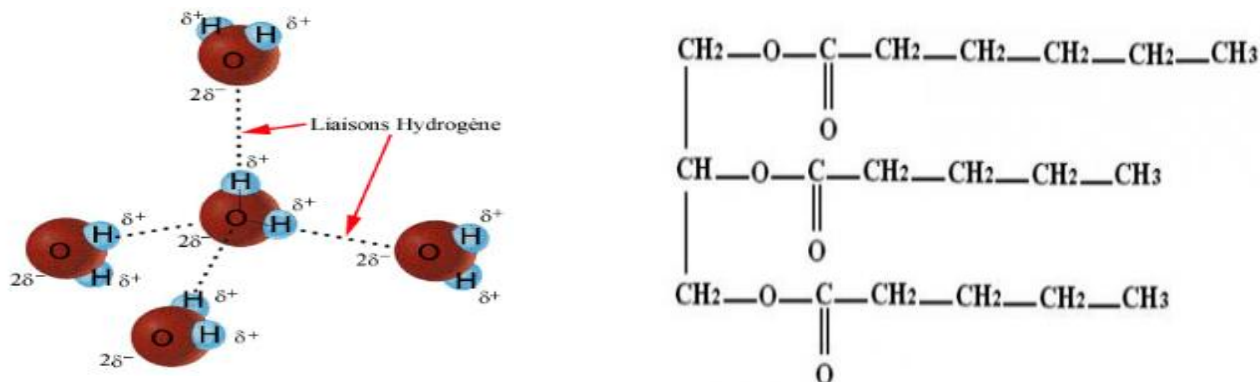


Figure 3.14 : structure de l'eau et l'huile

Ainsi, il peut y avoir attraction électrostatique entre l'atome d'oxygène (O) d'une molécule d'eau (H₂O) et l'un est un atome hydrogène (H) d'une autre molécule d'eau. La liaison formée est dite "liaison hydrogène". Toutes les molécules possédant un groupement --- OH pourront donc former des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau (Fig. 3.13).

En revanche, la structure de la molécule d'huile qui fait partie de la famille des triglycérides répond à la formule brute C₁₉H₃₄O₆. L'huile ne présente pas de groupement polaire et n'a aucune affinité avec l'eau. Ces deux liquides ne sont donc pas miscibles.

Comment donc stabiliser cette émulsion ?

C'est l'ajout de molécules présentant à la fois une affinité pour l'eau et pour l'huile qui permet la stabilisation d'une émulsion eau-huile ou huile-eau. Ces molécules sont nommés composés tensioactifs. Les molécules tensioactives qui permettent de stabiliser des émulsions alimentaires sont appelées émulsifiants,

Dans le cas de la mayonnaise, c'est la lécithine présente dans le jaune d'œuf qui joue le rôle de l'émulsifiant. La lécithine (figure 3.16) possède une tête chargée électriquement qui est hydrophile (qui aime l'eau) et une queue hydrophobe (apolaire) qui est **lipophile**.

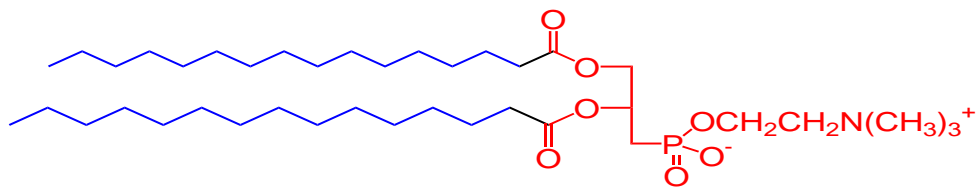


Figure 3.15 : Structure de la lécithine

Dans le cas cette émulsion, l'eau est majoritaire, l'huile est sous forme de gouttelettes. Chaque gouttelette d'huile est enrobée par les molécules de la lécithine, grâce à leurs queues lipophiles, et forme une micelle (Fig. 3.16). Chaque micelle est liée à des molécules d'eau par les têtes hydrophiles. Ainsi les gouttelettes d'huile sont séparées et l'émulsion est stabilisée [44].

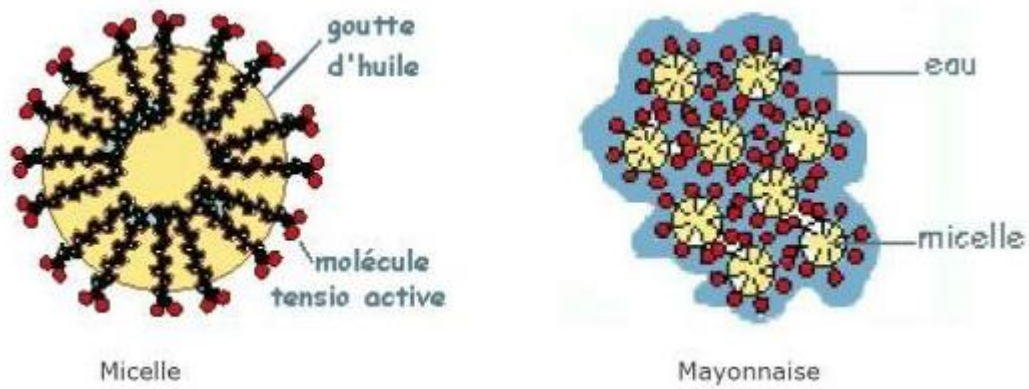


Figure 3.16 : Rôle des tensioactifs dans la stabilisation de la mayonnaise [45]

Les molécules de l'émulsifiant contribuent en fait également à la stabilité de la mayonnaise, grâce à leurs têtes hydrophiles qui sont électriquement chargées et qui sont "à l'extrémité" des micelles : présentant toute la même charge électrique elles se repoussent. Ainsi, les micelles restent dispersées dans l'eau et grâce à leur surface hydrophile, forment des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau, ce qui évite la coalescence [45].

Conclusion générale

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire était d'étudier le comportement rhéologique de quelques produits alimentaires semi liquides, Le tracé des rhéogrammes (taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement) nous a permis d'établir des modèles mathématiques d'écoulement caractéristique pour chaque produit.

Ce travail, a été aussi pour nous l'occasion d'explorer les possibilités et les limitations du viscosimètre rotatif - Brookfield DV-I+ Viscosimètre - qui a été mis à notre disposition.

L'analyse des résultats et des rhéogrammes obtenus pour l'échantillon du yaourt et celui de la mayonnaise, montre que ce sont des produits qui ne s'écoulent que si une contrainte suffisante, appelée contrainte seuil, leur est appliquée. Les rhéogrammes tracés nous ont permis de voir qu'ils s'agissent de deux produits présentant des comportements différents

En outre, l'écart entre les modèles développés dans la littérature et ceux obtenus à l'aide des courbes de lissage est faible. Les résultats fournis par l'appareil peuvent donc être considérés comme fiables.

Cependant, il faut noter que la limitation en vitesse de rotation de l'appareil ne nous permet pas d'avoir une gamme très large de vitesses de cisaillement qui est nécessaire pour évaluer leurs comportements dans un plus large domaine de contrainte (un fluide peut avoir plusieurs types de comportement rhéologique pour différentes vitesses de cisaillements).

Pour l'étude de la structure, l'étude de l'émulsion huile/eau représentée par la mayonnaise dans ce travail nous a permis de voir et de comprendre ce qui se passe à l'échelle microscopique et comment on peut avoir à partir de deux constituants principaux immiscibles un produit macroscopiquement miscible et de plus stable. Nous avons pu avoir un aperçu sur la taille des particules de la phase dispersée, leur forme et leur distribution spatiale dans la phase continue et leur contribution à la stabilité d'une émulsion.

En conclusion, nous pouvons dire que les objectifs assignés à cette étude ont été atteints. Nous avons caractérisé quelques produits alimentaires et décrit leurs comportements rhéologiques à l'aide de quelques modèles classiques tout en évaluant les possibilités de l'appareil utilisé en testant deux produits de différentes consistances et compositions. Nous avons pu voir comment qu'une émulsion se comporte à l'échelle microscopique en mettant en avant le rôle de la taille des particules et de leurs distributions spatiales pour expliquer leur grande stabilité physique.

Bibliographie

- [1]: SCHER, J. Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires. *Technique de l'ingénieur*, Décembre, 2006, Vol. 3. F3300. 16 p.
- [2]: SCHASCHKE, C. J. food processing [en ligne]. [consulté le 28 Mai 2018].disponible sur: <<http://zums.ac.ir/files/research/site/ebooks/chemistry-chemical-engineering/food-processing.pdf>>
- [3]: STEFFE, J.F. Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd edition. Michigan, USA : Freeman Press, 1997. 418 p. ISBN 0-9632036-1-4.
- [4]: KOKINI, H.D. JOZEF, L. *Rheological Properties of Foods. s.l.*: Request, 2006, p. 125.
- [5]: BARNES, H.A. A handbook of elementary rheology. Dyfed, Wales. : University of Wales, 2000. ISBN 0-9538032-0-1.
- [6]: AKAHIRO, F. SAYAKA, I. MAKOTO, N. KAORU, K. KATSUYOSHI, N. *Food Hydrocolloids. Texture design for products using food hydrocolloids*. March 2012, Vol. 26, 2, pp. 412-420.
- [7]: BOURNE, M.C. Food texture and viscosity: concept and measurement. Second edition. California, USA: Academic press, 2002. 341p. ISBN 978-0-08-049133-2.
- [8]: BORWANKAR, R.P. *Food texture and rheology: A tutorial review. [book auth.] R. BORWANKAR and C.F. SHOEMAKER. Rheology of Foods. Illinois: ELSEVIER science publishers Ltd, 1992, p. 1.*
- [9]: ROSENTHAL, J.C. *Modifying food texture. Volume 1: Novel Ingredients and Processing Techniques. United Kingdom: Woodhead. Elsevier Ltd, 2015. ISBN 1782423338.*
- [10]: JIANSHE, C. LAETITIA, L. *The determining role of bolus rheology in triggering a swallowing. Food Hydrocolloids*. 2011, Vol. 25, 3, pp. 325-332.
- [11]: RAO, M. A. Rheology of Fluid and Semisolid Foods Principles and Applications. 2nd edition. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, 1999. 337 p. ISBN 0-8342-1264-1.
- [12]: BRUMMER, R. Rheology Essentials of Cosmetics and Food Emulsions. New York: Springer, 2006. ISBN 3540255532.

- [13]: JASIM, A. PAWEL, P. SANTANU, B. Advances in Food Rheology and Its Applications. Duxford: Woodhead Publishing, 2017. ISBN 978-0-08-100431-9.
- [14]: SHOICHI, G. HIDEFUMI, Y. Microstructure, composition, and their relationship with emulsion stability: *Food microstructure and Its relationship with quality and stability. s.l.: Woodhead Publishing, 2017, pp. 97–122. ISBN 978-0-08-100764-8.*
- [15]: Phillips, G.O. Williams, P.A. Handbook of Hydrocolloids. Second edition. s.l.: Woodhead Publishing, 2009, pp. 23–49. ISBN 978-1-84569-414-2.
- [16]: GALLEGOS, C. FRANCO, J.M. Rheology of food emulsions s.l.: Elsevier B. V, 1999, pp. 87-118. ISBN 978-0-444-82679-4.
- [17] : MAURER, K. *Étude rhéologique et texturale de dispersions alimentaires. Essai de quantification de leur complexité structurale au moyen du concept de géométrie fractale.* 250 p. Thèse de doctorat : Biotechnologies et industries alimentaires. Institut national polytechnique de lorraine :1996.
- [18] : OVARLEZ, G. *Caractérisation rhéologique des fluides à seuil.* Rhéologie. 2011, Vol. 20, pp. 28-43.
- [19] : LANNABI, I. SAL, A.R. *Analyse microbiologique d'un produit laitier (Yaourt) : enquête alimentaire.* 78 p. *mémoire fin d'étude : Microbiologie générale : Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie : 2015*
- [20] : DJAMILA, I. Rachida, D. *Enquête sur le yaourt Danone et évaluation des paramètres physicochimiques (viscosité, acidité Dornic, pH) et microbiologiques (flore lactique) du yaourt Danone Yaoumi. Bejaïa, Algérie. 85 p. Mémoire de fin d'étude.* Université A. MIRA - Bejaia, Algérie : 2015.
- [21]: MAINGONNAT, T. BENEZECH, J.F. Characterization of the Rheological Properties of Yoghurt-A Review. Journal of Food Engineering. Février 16, 1994, Vol. 21, 4, pp. 447-472.
- [22] : KORA, E.P. *Interactions physico-chimiques et sensorielles dans le yaourt brassé aromatisé : quels impacts respectifs sur la perception de la texture et de la valeur.* 258 p. Thèse doctorat. Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires : Institut national agronomique PARIS-GRIGNON. Paris: 2004.

- [23]: THOMAS, G.M. the rheological handbook .second edition. Hannover, Germany : Vincentz Network GmbH & Co.KG, 2006. 299 p. Technique & ingénierie.ISBN 3-87870-174-8.
- [24]: LEMAIRE, E. BENJAMIN, C. MOHAMED, Y. Isabelle, D. High-frequency viscoelastic measurements of fluids based on microcantilever sensing: New modeling and experimental issues. *Sensors and Actuators A: Physical*, October 2013, Vol. 201. F-33400 . p. 230-240.
- [25] : TOTSCHNIG, W. P. *Les fluides non-newtoniens : entre liquide et solide*. Olympiades de Physique France, 8 Décembre 2017, l'INSA de Toulouse, la Société française de physique. France: 2017.
- [26] : GUY, C. JEAN, L.G. NICOLAS, H. Initiation à la rhéologie: bases théoriques et applications expérimentales. 4 ème édition. Lavoisier. Paris : 2014. 309 p. recherche & ingénierie. ISBN 978-2-7430-1568-8.
- [27] : HAMOUDI, H. *Rhéologie des fluides complexes: Etude de l'écoulement des fluides non newtonien dans des microsystèmes*. 112 p. Thèse de Magister: Mécanique: université des sciences et de la technologie MOHAMMED BOUDIAF d'ORAN: 2014.
- [28]: SINA, K. ARUN, P. BUJANG, B. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Review of Newtonian and non-Newtonian fluids behaviour in the context of grouts. Taylor & Francis Group. London : Giulia Viggiani, 2012. p. 321- 326. ISBN 978-0-415-68367-8
- [29]: RAO, A. Rheology of Fluid and Semisolid Foods Principles and Applications. second edition. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, 1999. 337 p. ISBN 0-8342-1264-1.
- [30]: AMETEK Brookfield, Inc. More solutions to sticky problems [en ligne]. Boulevard, Middleboro,USA : BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, 2017 [consulté le 04 Mai 2018 Disponible sur:
<<https://www.brookfieldengineering.com//media/ametekbrookfield/tech%20sheets/more%20solutions%202017.pdf?la=en>>
- [31] : HAMMADI, L. Chapitre 2: Fluides Non-Newtoniens. Rhéologie des fluides complexes. USTOMB, Algérie .
- [32]: RIGAL, C. Comportement de fluides complexes sous écoulement : Approche expérimentale par résonance magnétique nucléaire et techniques optiques et simulations

numériques [en ligne]. Thèse de doctorat: Mécanique et énergétique. Université de Lorraine, 2012. [consulté le 3 Mars 2018]. disponible sur l'adresse:

<http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2012_0091_RIGAL.pdf>

[33] : ELISABETH, G. *Rhéologie des fluides complexes*. École d'ingénieur. Rhéologie des fluides complexes, France 2001. <cel-01522165>.

[34]: NGUYEN, Q.D. BOGER, D.V. Thixotropic behaviour of concentrated real mud suspensions. *Rheological acta*, July, 1985, vol 24 n°4, p.427-437.

[35]: Serpil, S. Servet, G. *Physical Properties of foods*. Heldman associates. New York :Springer, 2006. ISBN-13: 978-0387-30780-0.

[36]: ALDERMAN, N. *Non-newtonien fluids, guide to classification and characteristics*. London. December, 1997. 30 p. ISBN 978 -1- 86246 -036- 2.

[37]: TA Instruments. *Rheology Software Models: Rheology software models (flow)* [en ligne] disponible sur: <<http://www.tainstruments.com/pdf/literature/RN9.pdf>>

[38]: BARNES, H.A. HUTTON, J.F. WALTERS, K. *An introduction to rheology*, first edition. Amstardam : K. Walters, 1989. 200 p. ISBN 0-444-87469-0.

[39]: BINGHAM, E. *Fluidity and plasticity*. First edition. New York : H.P. Talbot, 1922. 440 p .ISBN 978-1432696757.

[40]: CASSON, N. *In rheology of disperse systems: A flow equation for pigmente-oil suspensions for the printing ink type*. New York : 1959. 21 p.

[41]: CROSS, M. *Rheology of non-Newtonian flow: equation for pseudoplastic systems*. *Journal of Clolloid Science*, Juin , 1965, vol 20, n°5,p.417-437.

[42]: KIRK, O. *Encyclopedia of chemical technology volume 21*. Fourth edition. New York, USA: John Wiley & Sons, 2001.542 p. ISBN: 0471484946.

[43]: SANTANU, B. *Rheological, textural, micro-structural and sensory properties of mango jam*. *Journal of Food Engineering*, Séptember, 2010, Vol 100, n° 2 ,p. 357–365.

[44] : *La gastronomie moléculaire* [en ligne]. [Consulté le 10 Mai 2018]. Disponible sur :

<L'étude%20d'une%20émulsion%20_%20la%20Mayonnaise.html>

[45] : TPE gastronomie moléculaire [en ligne]. [Consulté le 15 Avril 2018]. Disponible sur : <http://chavaboisse.e-monsite.com/pages/les-emulsions/la-mayonnaise.html>

[46]: BENZECH, T. MAIGONNAT, J.F. Characterization of the rheological properties of yoghurt. *journal of food engineering*. 1994, Vol. 21, 4, pp. 447-472.

Annexe 1 : modèles de courbes d'écoulement

Model	Constitutive Equation	Viscosity	Rheological Parameters
Newtonian	$\tau = \mu_N \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_N$	μ_N (Pa s)
Power law	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	$\mu = K \dot{\gamma}^{n-1}$	K (Pa s ⁿ) n (dimensionless)
Bingham Plastic	$\tau = \tau_{yB} + \mu_B \dot{\gamma}$	$\mu = \frac{\tau_{yB}}{\dot{\gamma}} + \mu_B$	τ_{yB} (Pa) μ_B (Pa s)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_{yHB} + K \dot{\gamma}^n$	$\mu = \frac{\tau_{yHB}}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1}$	τ_{yHB} (Pa) K (Pa s ⁿ) n (dimensionless)
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{yC}} + \sqrt{\mu_C \dot{\gamma}}$	$\mu = \frac{[\sqrt{\tau_{yC}} + \sqrt{\mu_C \dot{\gamma}}]^2}{\dot{\gamma}}$	τ_{yC} (Pa) μ_C (Pa s)
Vocadlo	$\tau = (\tau_{yV}^{1/n} + K \dot{\gamma})^n$	$\mu = \frac{(\tau_{yV}^{1/n} + K \dot{\gamma})^n}{\dot{\gamma}}$	τ_{yV} (Pa) K (Pa s ⁿ) n (dimensionless)
Prandtl-Eyring	$\tau = a \sinh^{-1}(b \dot{\gamma})$	$\mu = \frac{[a \sinh^{-1}(b \dot{\gamma})]}{\dot{\gamma}}$	a (Pa) b (s)
Powell-Eyring	$\tau = c \dot{\gamma} + a \sinh^{-1}(b \dot{\gamma})$	$\mu = c + \frac{[a \sinh^{-1}(b \dot{\gamma})]}{\dot{\gamma}}$	a (Pa) b (s) c (Pa s)

Modèles de courbes d'écoulement (suite)

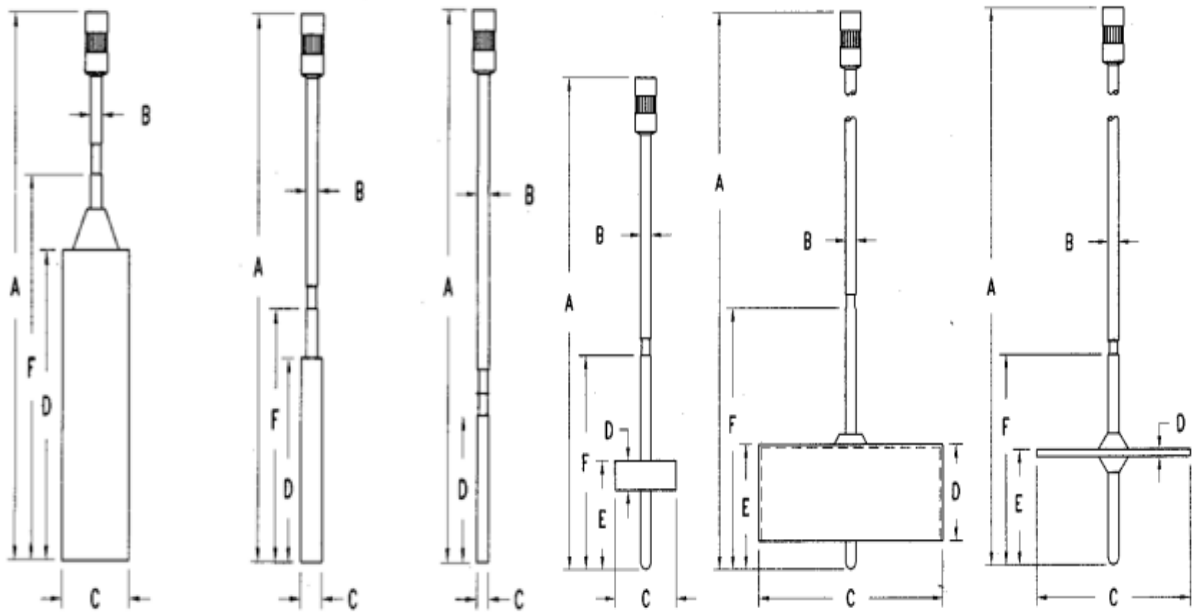
Model	Constitutive Equation	Viscosity	Rheological Parameters
Cross	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\dot{\gamma}^m} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\dot{\gamma}^m}$	μ_0 (Pa s) μ_{∞} (Pa s) a (s ^m) m (dimensionless)
Sisko	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + K\dot{\gamma}^{n-1} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + K\dot{\gamma}^{n-1}$	μ_{∞} (Pa s) K (Pa s ⁿ) n (dimensionless)
Carreau	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{[1 + (a\dot{\gamma})^2]^{m/2}} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{[1 + (a\dot{\gamma})^2]^{m/2}}$	μ_0 (Pa s) μ_{∞} (Pa s) a (s) m (dimensionless)
Van Wazer	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^m} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^m}$	μ_0 (Pa s) μ_{∞} (Pa s) a (s) b (s ^m) m (dimensionless)
Williamson	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\tau} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\tau}$	μ_0 (Pa s) μ_{∞} (Pa s) a (Pa ⁻¹)
Reiner-Philippoff	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\tau^2} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\tau^2}$	μ_0 (Pa s) μ_{∞} (Pa s) a (Pa ⁻²)
Meter	$\tau = \left\{ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\tau^m} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + a\tau^m}$	μ_0 (Pa s) μ_{∞} (Pa s) a (Pa ^{-m}) m (dimensionless)
Ellis	$\tau = \left\{ \frac{\mu_0}{1 + a\tau^{m-1}} \right\} \dot{\gamma}$	$\mu = \frac{\mu_0}{1 + a\tau^{m-1}}$	μ_0 (Pa s) a (Pa ^{1-m}) m (dimensionless)

Annexe 02 : Caractéristiques des différents mobiles du rhéomètre utilisé

Les dimensions des différents mobiles

Spindle	Figure	C-Diameter	D	E	F
#2 LV	1	.7370 (18.72)	.270 (6.86)	1.000 (25.4)	1.969 (50.0)
#3 LV	1	.4970 (12.6)	.070 (1.78)	1.007 (25.6)	1.969 (50.0)
#1 RV	2	2.2150 (56.26)	.885 (22.48)	1.062 (26.97)	2.406 (61.12)
#1 H	2	2.2150 (56.26)	.908 (23.06)	1.062 (26.97)	2.406 (61.12)
#2 RV	3	1.8477 (46.93)	.063 (1.65)	1.062 (26.97)	1.938 (49.21)
#2 H	3	1.8550 (47.12)	.063 (1.65)	1.062 (26.97)	1.938 (49.21)
#3 RV/H	3	1.3658 (34.69)	.063 (1.65)	1.062 (26.97)	1.938 (49.21)
#4 RV/H	3	1.0748 (27.3)	.063 (1.65)	1.062 (26.97)	1.938 (49.21)
#5 RV/H	3	.8324 (21.14)	.063 (1.65)	1.062 (26.97)	1.938 (49.21)
#6 RV/H	1	.5757 (14.62)	.063 (1.57)	1.188 (30.17)	1.938 (49.21)

Dimensions are in inches (mm). Dimension A is 4.531 (115) on LV spindles; 5.250 (133) on RV/H spindles. Dimension B is .125 (3.2) on all spindles.



Les mobiles cylindriques : facteurs et vitesses de cisaillement

Spindle	LV	RV**	HA**	HB**	Shear Rate (sec ⁻¹)
#1 LV	72/N **	780/N	1560/N	6240/N	0.220N
#2LV CYL	330/N ***	3350/N	6700/N	26.8M/N	0.212N
#3 LV CYL	1200/N*	12.9M/N	25.8M/N	103.2M/N	0.210N
#4 LV	6000/N*	64M/N	128M/N	512M/N	0.209N
#5 LV CYL ⁺	12M/N*	128M/N	256M/N	1024M/N	0.209N
#7 RV/H	3750/N*	40M/N	80M/N	320M/N	0.209N

N = RPM M = 1000 + = Optional Item

****Factors are for readings made without using the guardleg.**

Les dimensions des mobiles cylindriques

Spindle	Figure	C-Diameter	D	F
#1 LV	1	0.7418 (18.84)	2.563 (65.1)	3.188 (80.97)
#2 LV CYL	1	0.4037 (10.25)	2.124 (53.95)	2.624 (66.65)
#3 LV CYL	2	0.2315 (5.88)	1.688 (42.86)	2.094 (53.19)
#4 LV	3	0.1250 (3.2)	1.221 (31.01)	N/A
#5 LV	3	0.1250 (3.2)	0.536 (13.61)	N/A
#7 RV/H	3	0.1250 (3.2)	1.983 (50.37)	N/A

Dimensions are in inches (mm). Dimension A is 4.531 (115) on LV spindles; 5.250 (133) on RV/H spindles.

Dimension B is .125 (3.2) on all spindles.

Annexe 3 : les différents composants d'un viscosimètre BROOKFIELD

