

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB -BLIDA**

**FACULTE DES SCIENCES AGRO-VETERINAIRES ET BIOLOGIQUES**

**DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

**Etude de comportement rhéologique du chocolat noir  
formulé à base de différents ingrédients**

Projet de fin d'études en vue de l'obtention  
Du diplôme de Master 2  
Spécialité : Sciences Alimentaires

Présenté par :

**GATHAL Raoudha**

**Devant le jury composé de :**

Mr. KADRI B.	MCB	USDB	Président de jury
Mr . ELHADI DJ.	MCA	USDB	Promoteur
Mr. HADJ SADOK.	MCB	USDB	Examineur
Mme KOUIDRI A.	MCB	USDB	Examinatrice

## Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un nombre de personnes. Je souhaite ici les en remercier :

La première personne que je tiens à remercier est mon promoteur Monsieur ELHADI pour avoir encadrer ce travail et pour la confiance qu'il m'a témoigné.

Ma grande gratitude et mes vifs remerciements s'adressent à Imed KECHACHA responsable de l'hygiène à l'entreprise de BIMO pour toutes les aides précieuses qu'il m'a apportée tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier également l'équipe de laboratoire des analyses physicochimiques de la chocolaterie BIMO pour leur disponibilité et leur collaboration dans le laboratoire.

Mes remerciements vont également à Monsieur KADRI pour l'honneur qu'il m a fait de présider le jury.

A Monsieur HADJ SADOK et Madame KOUIDRI pour avoir accepter d'examiner et juger ce travail

Je ne voudrais pas oublier de remercier Monsieur HADJ SADOUK, maitre de conférences au sein du département de chimie industrielle et son étudiante Imen pour leur aide sur la rhéologie.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents*

*Mes sœurs et mon frère ainsi qu'à toute ma grande famille.*

*Mes proches et mes amis.*

Le chocolat est un produit à large consommation, sa qualité dépend fortement de ses propriétés rhéologiques qui sont influencées surtout par sa composition. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la masse de cacao, du beurre de cacao et de la lécithine de soja sur la rhéologie du chocolat noir. La stratégie expérimentale adoptée dans ce sens a été celle des plans d'expériences qui nous a permis de modéliser les propriétés rhéologiques ainsi que d'optimiser la formule afin d'obtenir de bonnes propriétés rhéologiques.

Le chocolat noir a montré un comportement rhéofluidifiant, ce comportement n'a pas été affecté par la composition. La modélisation par le modèle de Casson a montré une grande corrélation avec les courbes d'écoulement. Ce modèle nous a permis de faire sortir deux propriétés rhéologiques qui sont : la contrainte seuil et la viscosité plastique. Nous avons trouvé que ces paramètres augmentent avec la teneur en masse de cacao dans la formule et diminuent avec l'augmentation de la teneur en beurre de cacao. La lécithine de soja diminue la viscosité, son effet est plus accentué sur le chocolat n'ayant pas une teneur élevée en masse de cacao, et diminue également la contrainte seuil. Cependant, cette dernière peut revenir et augmenter à nouveau à une teneur élevée en lécithine.

Une formule optimale a pu être obtenue, possédant de bonnes propriétés rhéologiques et peut s'écrire comme suit : 45,36% de masse de cacao, 13,14% de beurre de cacao et 0,49% de lécithine.

**Mots clés** : Chocolat, cacao, lécithine de soja, rhéologie, plans d'expériences.



Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

Chocolate is a product widely consumed, its quality depends a lot on its rheological properties that are influenced mainly by its composition. The objective of this work is to study the effect of cacao liquor, cocoa butter and lecithin on the rheology of the dark chocolate. The experimental strategy in this case was the experimental design that allows us to model the rheological properties as well as to optimize the formulation to obtain good rheological properties.

Dark chocolate showed Shear-Thinning behavior, this behavior have not been affected by its composition. Modeling with the Casson model showed a high correlation with the flow curves. This model allows us to bring out two rheological properties that are: the yield stress and the plastic viscosity. We found that these parameters increase with the cacao liquor content in the formulation and decrease with the increasing of the cacao butter content. Lecithin reduces the viscosity, its effect is more pronounced on chocolate with low cacao liqueur content, and decreases the yield stress. However, the yield stress can come back and increase at a high lecithin content.

Optimal formulation was obtained, with good rheological properties and can be written as follows: 45.36% cocoa mass, 13.14% of cocoa butter and 0.49% lecithin.

**Key words:** Chocolate, cocoa, lecithin, rheology, experimental design.

الشوكولاتة منتج واسع الاستهلاك ، نوعيته تعتمد بشكل كبير على خصائصه الريولوجية التي تتأثر بشكل رئيسي بمكوناتها، الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير الكاكاو الشامل، زبدة الكاكاو وليسيتين الصوجا على ريولوجيا الشوكولاتة الداكنة. الإستراتيجية التجريبية المتبعة من أجل هذا الغرض هي المخطط التجريبي الذي يسمح لنا بالحصول على نموذج للخصائص الريولوجية وكذلك تحسين الوصفة من اجل الحصول على خصائص ريولوجية جيدة.

الشوكولاتة الداكنة أظهرت سلوكا ريرفلوديقي ، هذا السلوك لم يكن متأثرا بمكونات الشوكولاتة . أظهرت المطابقة بنموذج كاسون ارتباط كبير مع منحنيات التدفق ، هذا النموذج سمح لنا باستخراج خاصيتين ريولوجيتين اجهاد الخضوع و اللزوجة البلاستيكية . لقد وجدنا أن هذه الخصائص تزيد بزيادة كمية الكاكاو الشامل وتنخفض بزيادة كمية زبدة الكاكاو في التشكيلة . اللسيتين يقلل من اللزوجة البلاستيكية تأثيره يكون أكثر على الشوكولاتة ذات الكمية القليلة من الكاكاو الشامل ، اللسيتين يقلل أيضا اجهاد الخضوع غير أن هذا الاخير يمكن أن يعود ويرتفع بزيادة اللسيتين .

تم الحصول على الوصفة المثلى، ذات الخصائص الريولوجية الجيدة ويمكن أن تكتب على النحو التالي: 45.36% من الكاكاو الشامل، 13.14% من زبدة الكاكاو و 0.49% اللسيتين

#### الكلمات المفتاحية :

الشوكولاتة الكاكاو، ليسيتين الصوجا، الريولوجيا، مخطط التجارب.

## Table des matières

.....	1
<b>PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I : LE CHOCOLAT</b> .....	<b>4</b>
I.1. Historique .....	5
I.2. Définition du chocolat .....	6
I.3. Cacao et transformation .....	6
I.3.1. Description du cacaoyer .....	6
I.3.2. Transformation du cacao .....	8
I.4. Les constituants du chocolat .....	14
I.4.1. La masse de cacao (pâte ou liqueur de cacao) .....	14
I.4.2. Le beurre de cacao .....	15
I.4.3. Le sucre .....	17
I.4.4. Les émulsifiants (la lécithine) .....	17
I.4.5. Lait en poudre .....	19
I.4.6. Les arômes .....	19
I.5. Les catégories du chocolat .....	20
I.5.1. Le chocolat noir .....	20
I.5.2. Le chocolat au lait .....	20
I.5.3. Le chocolat blanc .....	20
I.5.4. Le chocolat de couverture .....	20
I.6. La fabrication du chocolat .....	20
I.6.1 Le malaxage .....	21
I.6.2. Le broyage .....	21
I.6.3 Le conchage .....	23
I.6.4 Le tempérage .....	24
I.6.5 Le moulage et refroidissement .....	25
I.7 Conservation du chocolat .....	25
I.8 Les propriétés sensorielles du chocolat .....	26
1.8.1 L'apparence .....	26
I.8.2 Le goût .....	26
I.8.3 L'odeur .....	26
I.8.4 La texture .....	26

<b>GIQUE DES ALIMENTS .....</b>	<b>27</b>
II.1. Définition de la rhéologie.....	28
II.2. Rhéologie des fluides alimentaires.....	28
II.2.1. Définition d'un fluide.....	28
II.2.2. Loi de la viscosité.....	28
II.2.3. Comportement rhéologique des fluides .....	30
II.3. Rhéologie des solides alimentaires.....	35
II.4. Rhéologie des gels.....	36
II.5. Rhéologie des poudres alimentaires.....	37
II.6 Caractéristiques rhéologiques du chocolat.....	38
<b>PARTIE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>40</b>
<b>CHAPITRE I : MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>41</b>
I. 1. Matériel .....	42
I. 2. Méthodes .....	43
I. 2.1. Méthodes d'analyse pour la caractérisation de la matière première .....	43
I.2.2. Etablissement d'un plan d'expérience.....	46
I.2.3. Fabrication du produit .....	49
I.2.4. Méthodes d'analyse pour la caractérisation des essais .....	51
I.2.4.1. Mesure de la taille des cristaux de sucre (la finesse du chocolat) .....	51
I.2.4.2. L'étude de comportement rhéologique.....	51
<b>CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>53</b>
II.1. Résultats de la caractérisation de la matière première .....	54
II.1.2 La masse de cacao.....	54
II.2.2 Le beurre de cacao .....	55
II.2. La taille des cristaux de sucre (la finesse du chocolat) .....	57
II.3. Caractérisation rhéologique des essais .....	58
II.3.1. Les courbes de viscosité des essais.....	58
II.3.2. Courbes d'écoulement des essais et leur modélisation .....	59
II.3.3. Paramètres rhéologiques de chaque essai formulé .....	65
II.4 Modélisation des repenses (les paramètres rhéologiques).....	66
II.4.1. Etablissement des modèles .....	66
II.4.2. Evaluation des modèles.....	66





**PDF Complete**

*Your complimentary use period has ended. Thank you for using PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)

la variation des réponses en fonctions de chaque	67
II.5. Optimisation	76
<b>CONCLUSION</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>77</b>



Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## e des abréviations

**AC** : Acide.

**AFNOR** : Association Française de Normalisation.

**CBEs** : Cocoa Butter Equivalent.

**cm** : centimètre.

**FAO** : Food and agriculture organization.

**FCC** : Fédération de commerce de cacao.

**g** : gramme.

**h** : heure.

**IOCC** : International Office of Cocoa and Chocolate

**ISO** : International Organization for Standardisation

**Kg** : kilogramme

**KOH** : Hydroxyde de potassium

**min** : minute

**ml** : millilitre.

**mm** : millimètre.

**N** : Normalité

**NE** : Norme Européenne

**NF** : Norme française

**PE** : point d'ébullition.

**Pa** : Pascal

**s** : seconde

**T** : Température.

**WCF** : World Cocoa Foundation.

**%** : Pourcentage

**°C** : degré Celsius

**µm** : micromètre

## ste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b>	Composition de la pâte de cacao.....	<b>15</b>
<b>Tableau 2 :</b>	Point de fusion des cristaux du beurre de cacao .....	<b>16</b>
<b>Tableau 3 :</b>	Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique.....	<b>31</b>
<b>Tableau 4 :</b>	Gammes de viscosité et de limites d'écoulement des chocolats et couvertures selon les usages.....	<b>39</b>
<b>Tableau 5 :</b>	Les contraintes de la modélisation.....	<b>48</b>
<b>Tableau 6 :</b>	La matrice d'expériences du plan D-optimal pour les mélanges beurre de cacao – masse de cacao – sucre – lécithine .....	<b>49</b>
<b>Tableau 7 :</b>	Résultats des analyses physico-chimiques de la masse de cacao	<b>54</b>
<b>Tableau 8 :</b>	Résultats des analyses physico-chimiques du beurre de cacao	<b>55</b>
<b>Tableau 9 :</b>	La taille des cristaux de sucre pour chaque essai donné.....	<b>57</b>
<b>Tableau 10 :</b>	Paramètres rhéologiques de chaque essai formulé .....	<b>65</b>
<b>Tableau 11 :</b>	Les valeurs de $R^2$ et $R^2$ ajusté .....	<b>66</b>

## Table des figures

<b>Figure 1 :</b>	Dessin descriptif du cacaoyer .....	<b>07</b>
<b>Figure 2 :</b>	Les cabosses du cacaoyer .....	<b>08</b>
<b>Figure 3 :</b>	Coupe transversale d'une cabosse.....	<b>08</b>
<b>Figure 4</b>	Fèves de cacao.....	<b>10</b>
<b>Figure 5 :</b>	Transformation de fèves de cacao en produits semi-finis .....	<b>13</b>
<b>Figure 6 :</b>	Formule chimique de la lécithine .....	<b>18</b>
<b>Figure 7 :</b>	Schéma de la fabrication des chocolats .....	<b>20</b>
<b>Figure 8</b>	Mélange des ingrédients dans le pétrin .....	<b>21</b>
<b>Figure 9 :</b>	Schéma d'une broyeuse cinq cylindres .....	<b>22</b>
<b>Figure 10 :</b>	Schéma d'une conche .....	<b>24</b>
<b>Figure 11 :</b>	Écoulement entre deux plans parallèles .....	<b>29</b>
<b>Figure 12 :</b>	Courbe d'écoulement complète d'un fluide non newtonien, avec l'interprétation structurale lors du cisaillement .....	<b>32</b>
<b>Figure 13 :</b>	Courbes d'écoulement des fluides indépendants du temps .....	<b>33</b>
<b>Figure 14:</b>	Courbes de viscosité des fluides indépendants du temps .....	<b>33</b>
<b>Figure 15:</b>	Comportement des fluides dépendants du temps.....	<b>34</b>
<b>Figure 16:</b>	Exemples de tests rhéologiques réalisés à partir de machines de compression ou d'étirement .....	<b>35</b>
<b>Figure17 :</b>	Digramme de fabrication des essais établi à l'échelle industrielle ..	<b>50</b>
<b>Figure 18 :</b>	Courbes des viscosités des essais.....	<b>58</b>
<b>Figure 19 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (1) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	<b>60</b>
<b>Figure 20 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (2) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	<b>60</b>
<b>Figure 21 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (3) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	<b>60</b>
<b>Figure 22 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (4) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	<b>60</b>
<b>Figure 23 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (5) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	<b>61</b>

	ent de l'essai (6) et courbe d'ajustement du	61
<b>Figure 25 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (7) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	61
<b>Figure 26 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (8) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	61
<b>Figure 27 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (9) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	62
<b>Figure 28 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (10) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	62
<b>Figure 29 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (11) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	62
<b>Figure 30 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (12) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	62
<b>Figure 31 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (13) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	63
<b>Figure 32 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (14) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	63
<b>Figure 33 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (15) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	63
<b>Figure 34 :</b>	Courbe d'écoulement de l'essai (16) et courbe d'ajustement du modèle de Casson.....	63
<b>Figure 35 :</b>	Variation de la viscosité plastique de Casson en fonction du pourcentage massique de la masse de cacao.....	67
<b>Figure 36 :</b>	Variation de la contrainte seuil en fonction du pourcentage massique de la masse de cacao.....	68
<b>Figure 37 :</b>	Variation de la viscosité plastique de Casson en fonction du pourcentage massique du beurre de cacao.....	69
<b>Figure 38 :</b>	Variation de la contrainte seuil en fonction du pourcentage massique du beurre de cacao.....	70
<b>Figure 39 :</b>	Variation de la viscosité plastique de Casson en fonction du pourcentage massique de la lécithine.....	71

	contrainte seuil en fonction du pourcentage de lécithine.....	<b>72</b>
<b>Figure 41 :</b>	Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la contrainte seuil à un taux de lécithine fixé à 0,5% .....	<b>74</b>
<b>Figure 42 :</b>	Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la viscosité de Casson à un taux de lécithine fixé à 0,5% .....	<b>74</b>
<b>Figure 43</b>	Surface de réponse tracée a partir de l'équation de modélisation de la contrainte seuil à un taux de beurre de cacao fixé à 10% ....	<b>75</b>
<b>Figure 44</b>	Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la viscosité de Casson à un taux de beurre de cacao fixé à 10% .....	<b>75</b>
<b>Figure 45</b>	Domaine expérimental ainsi que la position des points des mélanges .....	<b>76</b>
<b>Figure 46</b>	La formule sélectionnée et ses critères .....	<b>77</b>



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# INTRODUCTION

Le chocolat est un aliment issu de la fève de cacao, sa consommation dans le monde a augmenté et tend à s'universaliser de façon considérable ces dernières années, il est l'un des rares aliments qui ont réussi à prendre une place de denrée de base tout en conservant celle d'aliment de plaisir. Il est également un ingrédient courant populaire dans de nombreuses confiseries, glaces, biscuits, tartes, gâteaux et desserts.

Le chocolat est un produit de composition simple (masse de cacao, beurre de cacao, et sucre), mais dont la richesse organoleptique et la complexité physico-chimique en constituent des pôles d'attraction pour un large public d'amateur d'une part et un certain nombre de spécialistes de physico-chimie, d'autre part.

Un chocolat de haute qualité est lié essentiellement à sa qualité sensorielle qui est défini par sa saveur, sa texture, son goût, son apparence et sa texture. Cette qualité sensorielle est affectée par plusieurs paramètres tels que : les procédés de fabrication, la matière première ainsi que sa qualité, les propriétés d'écoulement ou la rhéologie.

La rhéologie est la science qui étudie les propriétés d'écoulement et de déformation de la matière. La composition et la structure d'un produit alimentaire déterminent ses propriétés rhéologiques. Les paramètres rhéologiques peuvent être utilisés comme caractéristiques intrinsèques de la qualité d'un produit, ils peuvent également fournir des informations concernant l'organisation structurale des aliments et être mis en relation avec les caractéristiques structurales, un lien peut aussi, parfois, être établi avec la perception et les attributs sensoriels.

Les propriétés rhéologiques du chocolat sont essentiellement influencées par la distribution en taille des particules et par sa composition, ce qui influe sur la texture finale et les propriétés de fusion (Gonçalves et Lannes, 2010). C'est l'une des raisons pour lesquelles la compréhension de l'étude de la rhéologie du chocolat est d'une importance majeure pour les chocolatiers. Les autres raisons sont les suivantes: rendement de la production, l'économie de l'énergie, et les caractéristiques du produit final et son applicabilité (van der Vaart et al, 2013).

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la masse de cacao, du beurre de cacao et de la lécithine de soja sur les propriétés rhéologiques du chocolat noir. Pour ce faire, la méthode des plans d'expérience a été utilisée ce qui nous a permis de trouver les valeurs optimales de ces composants permettant de donner une formule de bonnes propriétés rhéologiques.





*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE**



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **CHAPITRE I**

## **LE CHOCOLAT**

## I.1. Historique

L'histoire du chocolat commence à l'époque de la découverte de l'Amérique. En 1492, au cours de son quatrième voyage vers le Nouveau Monde (Nacaragua), Christophe Collomb fut le premier européen à découvrir les fèves de cacao ; à l'époque, il n'y accorda pourtant pas la moindre importance. Le secret de cette denrée précieuse resta encore deux décennies entre les mains des Aztèques, jusqu'à ce que Fernand Cortez, célèbre conquistador espagnol, découvre en 1520 que les fèves de cacao étaient utilisées dans la préparation d'une boisson royale, le « Xocolatl ». Les fèves étaient torréfiées, broyées et diluées dans de l'eau pour se transformer en une boisson trouble qui était ensuite enrichie de vanille et autres épices. L'empereur aztèque Montezuma, un amoureux du chocolat, offrait à ses invités espagnols du Xocolatl dans une grande coupe en or. Cette coupe était jetée après un seul usage, ce qui prouvait bien que le Xocolatl était véritablement considéré comme une boisson divine. A son retour en 1528, Cortez ramena des fèves de cacao à son roi, Charles V d'Espagne. Ce dernier fut littéralement fasciné par cette nouvelle saveur, mais la jugea un rien trop amère ; il fit donc ajouter du sucre de canne au cacao. Le cacao devint alors une boisson extrêmement appréciée de la noblesse européenne (Anonyme, 2008).

Au cours du 17<sup>ème</sup> siècle, il commence à se diffuser un peu partout en Europe. En France, on le découvre en 1615, à l'occasion du mariage d'Anne d'Autriche. A cette époque, le chocolat était surtout connu et apprécié à la cour, chez les religieux et les médecins.

Le XIX<sup>ème</sup> siècle marque le début de l'industrialisation en Europe et va permettre la démocratisation du chocolat. Les plantations de cacaoyers se développent dans le monde. L'industrie chocolatière se perfectionne dans divers pays grâce à d'importantes inventions, notamment celle de la machine hydraulique pour broyer le cacao et le réduire en pâte, favorisant ainsi la production de chocolat en grande quantité. En passant de la boisson à la tablette (créée par les britanniques en 1847), le chocolat diversifie sa présentation et multiplie ses modes de consommation. Le chocolat au lait est ensuite inventé par les Suisses en 1875 et les barres chocolatées apparaissent au début des années 1920 aux Etats-Unis et aux Pays-Bas (Anonyme, 2012).

Aujourd'hui on compte une trentaine de pays producteurs du cacao. La production mondiale de cacao s'élève à 3,5 millions de tonnes en moyenne par an et provient principalement des pays d'Afrique de l'Ouest. La Côte d'Ivoire est le principal pays producteur avec 1,2 million de tonnes par an, et le Ghana est le second, avec 750 000 tonnes. Avec l'Indonésie, ces trois pays représentent 69% de la production mondiale. Environ 70% du cacao est d'origine africaine (WCF, 2010).

de cacao (c'est-à-dire le cacao contenu dans tous les produits) en 2002 a été d'environ 0,53 kg/personne. Il existe toutefois de grandes variations régionales : la consommation moyenne par personne était d'environ 1,87 kg en Europe, 1,20 kg en Amérique, 0,11 kg en Asie/Océanie et 0,13 kg en Afrique.

En Europe, la consommation est plus forte dans les pays du nord et alpins et plus faible dans les pays du sud. Le premier pays consommateur est la Suisse avec 12,3 kg par an et par habitant (2007), suivi de l'Autriche et de l'Irlande. L'Espagne, la Grèce et le Portugal sont les plus faibles consommateurs. La France arrive en 11<sup>ème</sup> position avec 4,8 kg/an/habitant (ICCO, 2002).

## I.2. Définition du chocolat

Produit obtenu à partir de cacao en grains, de cacao en pâte, de cacao en poudre ou de cacao maigre en poudre et de saccharose, avec ou sans addition de beurre de cacao. Des additions sont prévues : matières aromatiques, lécithine et matières comestibles (Brochoire, 1998).

## I.3. Cacao et transformation

### I.3.1. Description du cacaoyer

Le cacao provient des fruits (fèves) du cacaoyer. Le cacaoyer (figure 1) appartient à la famille des sterculiacées, au genre *Théobroma* et à l'espèce *cacao*. Le genre *Theobroma* regroupe vingt deux espèces, la seule espèce cultivée commercialement est *Théobroma cacao* (Stéphane et Koffi, 2009).

Le cacaoyer est un arbuste au feuillage persistant qui s'épanouit dans les régions tropicales, c'est un arbuste exigeant et fragile : il doit être à l'abri du vent et du soleil.

Le cacaoyer commence à porter des fruits au cours de sa 3<sup>ème</sup> année, et ce, pendant 20 ans (Coquitart, 2003). Il peut atteindre une hauteur de 15 mètres mais pour faciliter la récolte on l'élague normalement à 6 mètres.

Les feuilles du cacaoyer sont de couleur vert foncé et mesurent près de 30 cm de longueur. Étant d'une forme oblongue et pointue elles sont comparables aux feuilles d'un châtaignier.

Les fleurs blanches du cacaoyer sont très petites par rapport à ses fruits. Leur diamètre s'élève seulement à environ 8 millimètres (Gamsriegler, 2002).



**Figure 1** : Dessin descriptif du cacaoyer (Daverio, 2005).

La marque la plus frappante du cacaoyer sont ses fruits, appelés cabosses. La cabosse est comme les feuilles, ovale et pointue ressemblant à un petit ballon de rugby. Sa taille moyenne est de 15 à 30 cm de longueur et de 6 à 10 cm de largeur. Elle pèse normalement environ 500 grammes (Gamsriegler, 2002). Les cabosses (figure 2) changent de couleur au fur et à mesure de leur mûrissement : de vertes, elles deviennent violettes ou jaunes-oranges. Les cabosses du groupe Forastero sont jaunes à maturité, alors que les Trinitario et les Criollo sont rouges et oranges (Martens, 2011).

La partie la plus véritable de la cabosse, les graines, se trouvent à l'intérieur de l'écorce résistant dans un mucilage blanchâtre. Cette pulpe qui enveloppe les graines est à la fois sucrée et légèrement acide. Les graines mêmes sont arrangées les unes contre les autres en 5 rangées à l'intérieur de la cabosse qui contient de 25 à 75 graines (Gamsriegler, 2002).



**Figure 2** : Les cabosses du cacaoyer  
(Delebecque et al, 1999).



**Figure 3** : Coupe transversale d'une  
cabosse (Dodémont, 2007).

### I. 3.2. Transformation du cacao

#### I.3.2.1 De la graine à la fève de cacao

##### a) La récolte

La récolte nécessite des précautions pour éviter d'abîmer les coussinets floraux. Quand les cabosses sont plus hautes, on coupe le pédoncule du fruit avec un sécateur. Quand elles sont basses, on utilise un émondoir (une petite faucille au bout d'une perche). On reconnaît une cabosse mûre à sa couleur et au son qu'elle rend lorsqu'on la tapote (delebecque et al, 1999).

##### b) L'écabossage

C'est l'opération qui permet d'ouvrir les cabosses et d'en extraire les grains de cacao. La séparation des fèves entre elles et l'élimination des débris favorisent une bonne fermentation (Stéphane et Koffi, 2009).

Les cabosses sont ouvertes en pratiquant une entaille en biais à l'aide d'un couteau que l'on fait tourner pour enlever une partie de la cabosse. Les fèves sont alors extraites à la main. Cette méthode d'écabossage présente généralement des inconvénients pour les fèves écorchées au niveau de la coque atteint souvent 5 %. Pour éviter la perte, on écrase les cabosses sur la pierre, à l'aide d'un maillet en bois, ou sur un tasseur triangulaire fixé sur une table. Un travailleur expérimenté peut traiter plus de 3000 cabosses chaque jour (Asiedu, 1991).



Après la récolte et leur ouverture présentait un aspect plus homogène et une diminution de l'acidité des graines et une montée plus rapide de la température au cours de la fermentation (Daverio, 2005).

### c) La fermentation

C'est l'étape la plus importante de la première transformation. Elle a pour but d'éliminer une grande partie de la pulpe qui entoure les graines, de supprimer leur pouvoir germinatif et de développer les précurseurs de l'arôme (Stéphane et Koffi, 2009).

Au début de la fermentation en effet, des levures transforment la pulpe sucrée dans laquelle baignent les graines et permettent à des bactéries de pénétrer à l'intérieur. Les protéines de la graine (devenue une fève) sont alors dégradées en acides aminés et en peptides, qui jouent le rôle de précurseurs d'arôme. L'arôme par lui-même ne se révèle vraiment qu'au cours de la torréfaction des fèves (Bardoulat, 2005).

Différentes méthodes sont utilisées : fermentation en sac, en paniers tressés, ou en caisses, la conduite de cette opération est pratiquement identique, à savoir, une élévation de température de 45 à 50°C, un brassage, et une durée variant de 3 à 7 jours suivant la variété de cacao (Bryselbout et Fabby, 2007).

L'absence de fermentation conduit à des fèves sans potentiel aromatique, de couleur ardoisée après séchage. Elle constitue un défaut majeur du cacao (Stéphane et Koffi, 2009).

### a) Le lavage

Après la fermentation, vient le séchage. Cependant dans quelques cas, assez rares, les fèves sont lavées, entre fermentation et séchage, pour finir d'éliminer la pulpe résiduelle.

Cette pratique donne des cacaos de très bel aspect, aux fèves lisses et propres, mais aussi plus fragiles, ce qui entraîne un taux de briseurs plus important (Barel, 1998).

Lorsque la fermentation arrive à son terme, les graines de cacao sont mises à sécher. L'intérêt du séchage est de ramener la teneur massique en eau des graines fermentées, qui est d'environ 60 %, à moins de 8 %, de manière à assurer au cacao de bonnes conditions de conservation pour le stockage et le transport. Mettre les graines à sécher stoppe la plupart des réactions fermentaires ; cependant, certaines oxydations continuent d'avoir lieu, en particulier celles dues à la polyphénoloxydase responsable du brunissement du produit (Pépin, 2002).

Diverses techniques de séchage des fèves fermentées sont utilisées. La plus appréciée est évidemment le séchage au soleil, sur de vastes claies, à l'air libre, sous abris fixes ou amovibles. Ce type de séchage dure plus de 7 jours. Des séchoirs statiques chauffés au gaz, au bois, au mazout, des séchoirs rotatifs à air chaud, etc. permettent de sécher les fèves plus rapidement (24 h) et plus sûrement, mais risquent de perturber l'arôme des fèves. Le séchage doit donc être attentivement contrôlé et les fèves surveillées (Martens, 2011).

La fève de cacao (figure 4) est le produit obtenu après fermentation et séchage de la graine fraîche. Elle constitue la matière première d'une importante industrie qui fabrique soit des produits semi-finis (pâte de cacao, fondue de cacao, beurre de cacao), soit des produits finis directement consommés (chocolat en poudre, en tablette) (Stéphane et Koffi, 2009).



**Figure 4 :** Fèves de cacao (delebecque et al, 1999).

### c) Le stockage

Il a une très grande influence sur la qualité du cacao. Les fèves fermentées et séchées doivent avant tout être gardées bien sèches dans des sacs en jutes propres en bon état. Les fèves de cacao vont subir un long parcours jusqu'à leur arrivée aux usiniers et aux transformateurs : Ceux qui seront chargés de la transformation en produits semi-finis ou finis (Stéphane et Koffi, 2009).



peut subir le produit au cours de son stockage : les responsables de l'appariation des fèves moisies, d'hydrolyses de la matière grasse, donnant un beurre acide et de mauvaise qualité.

Un autre défaut lié au stockage est l'infestation par des insectes, qui conduit aux fèves mitées. Outre la perte de poids générée par l'action des insectes, les trous de pénétration sont autant de portes ouvertes aux moisissures.

Enfin, un problème de qualité important trouve son origine dans le stockage : si les fèves sont stockées dans un endroit enfumé, près d'un lieu où se fait la cuisine , à proximité de réserves de gas oil , d'insecticides, d'engrais, si les sacs utilisés sont usagés, pourris, ou ont contenu d'autres produits, le cacao de par sa richesse en matière grasse, va fixer ses odeurs étrangères et deviendra défectueux (Barel, 1998).

### II.3.2.2. De la fève de cacao à la pâte de cacao (la masse de cacao)

#### a) Le nettoyage

Le procédé du nettoyage consiste en deux phases. Premièrement, les fèves, subissent un nettoyage préliminaire pendant lequel les résidus de bois et de sable provenant des sacs sont aspirés par de puissants courants d'air. Après, les fèves passent sur un tapis roulant où elles sont examinées soigneusement pour s'assurer qu'il ne reste plus d'impuretés (Gamsriegler, 2002).

#### b) La torréfaction

La torréfaction est, avec la fermentation, l'un des deux étapes essentielles pour la formation de l'arôme du chocolat. Ses buts sont multiples :

- Abaisser la teneur en eau des fèves de 7 à 2,5% ;
- Favoriser la séparation entre la coque et l'amande ;
- Continuer à éliminer l'acide acétique, formé à la fermentation ;
- Et surtout provoquer les réactions thermiques qui vont produire l'arôme chocolat : réactions de Maillard, caramélisation des sucres, dégradation des protéines, synthèse de composés soufrés.

Pour torréfier le cacao, on utilise des appareils à tambours. En générale, le cacao est torréfié à une température comprise entre 110 et 140°C, pendant une durée qui va de 15 à 40 minutes. Ce couple temps-température déterminera les principales caractéristiques du chocolat (Barel, 2009 ; Pépin, 2002).

Après la torréfaction, les fèves sont grossièrement concassées. Elles donnent des morceaux de coque, des germes et des morceaux de cotylédons appelés grués (Barel, 2009).

Cette étape a pour rôle de séparer les grains des coques. L'objectif du décorticage est de produire des grains avec le minimum de coques (2%). Il comprend trois opérations élémentaires (Stéphane et Koffi, 2009) :

- **Le concassage**

Il s'agit de soumettre les fèves à des chocs ou à des frictions afin de provoquer le cassage de la coque en abîmant moins les grains.

- **Le criblage**

Les grains et les coques ainsi obtenus sont triés par tamisage afin que chaque granulation puisse être soumise à une séparation appropriée.

- **Le vannage**

Les fragments de grains sont soumis à la dépression d'une colonne d'aspiration correspondant à chaque granulométrie dans laquelle on ajuste la vitesse de l'air afin que les coques ayant une densité apparente plus faible soient entraînées vers le haut de la colonne et les grains vers le bas. Ensuite, les coques sont acheminées vers la chaudière pour la production d'énergie.

#### **d) Le broyage**

Le broyage des fèves est effectué par des broyeurs. Les semi-produits issus du broyage sont la masse ou liqueur de chocolat, utilisée comme matière de base pour la fabrication du chocolat. Cette masse peut également être transformée par le broyeur, en :

- a. tourteau, à partir duquel on obtient le cacao en poudre.
- b. beurre de cacao, également utilisé dans la fabrication du chocolat, mais aussi dans les cosmétiques (Martens, 2011).

#### **e) Alcalinisation**

L'alcalinisation est devenue une technique classique pour neutraliser l'acidité, modifier la couleur et favoriser la solubilité du cacao dans l'eau. C'est une étape un peu particulière puisqu'elle peut avoir lieu à différents moments de la chaîne de transformation, directement sur les fèves, sur les fèves broyées, sur le cacao torréfié ou directement sur la poudre.

Les agents alcalins utilisés le plus souvent sont des carbonates et hydrocarbonates de potassium, des carbonates et des oxydes de magnésium, de la soude, de la potasse et des carbonates d'ammonium (Dodémont, 2007).

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

### Le cacao et de la poudre du cacao

La pâte de cacao (la masse de cacao) liquide est pressée et filtrée à environ 90°C et à haute pression (jusqu'à 500 kg/cm<sup>2</sup>) pour en extraire la partie liquide, c'est à dire la graisse (le beurre de cacao) qui est désodorisé par lavage à la vapeur (une distillation à la vapeur) (Anonyme, 2006).

Le résidu de pressage, le tourteau, est un disque très compact de plusieurs centimètres d'épaisseur. Il ne contient plus de 10 à 20 % de matières grasses (Barel, 2009). Les tourteaux sont broyés pour donner une poudre avec une finesse inférieure à 0,35%. Cette opération est appelée le blutage. La poudre ainsi obtenue, est tempérée et stockée pendant deux heures (durée nécessaire pour la cristallisation du beurre résiduel) avant son conditionnement (Stéphane et Koffi, 2009).

La figure (figure 5) suivante présente les principales étapes de transformation des fèves de cacao :

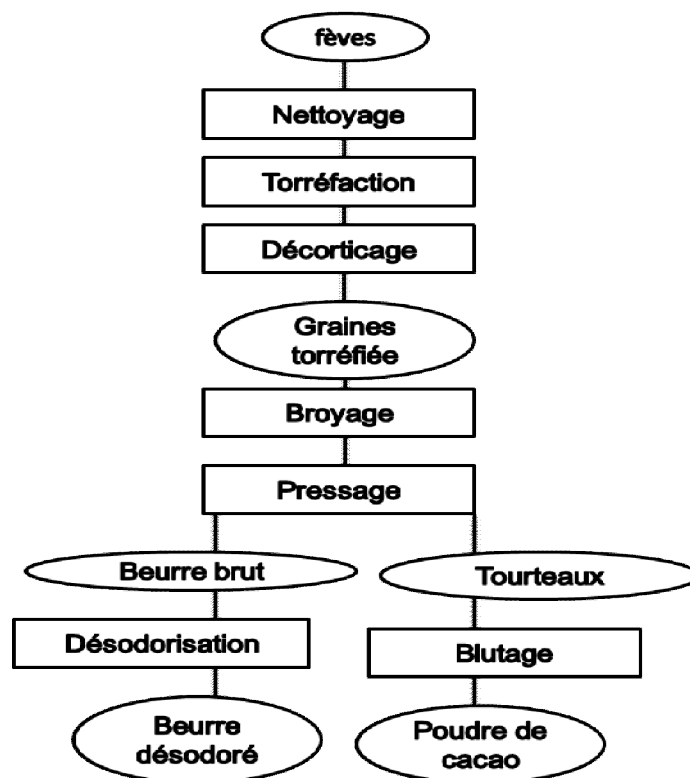


Figure 5 : Transformation de fèves de cacao en produits semi-finis (De Gineste, 1998)

lat

le cacao (matière sèche + beurre de cacao), de sucres et éventuellement d'autres ingrédients :

#### **I.4.1. La masse de cacao (pâte ou liqueur de cacao)**

La masse de cacao ou liqueur de cacao : fèves de cacao 100% nettoyées, débarrassées des bactéries, torréfiées, brisées et ensuite moulues finement. Etant donné que la fève est très riche en beurre de cacao (plus au moins 55%) on obtient après la mouture une pâte très fluide, brun foncé, amère et quelque peu acide (Wybauw, 2005), durcit en refroidissant et devient fluide quand on la chauffe, du fait que le beurre de cacao fond ou se fige (cristallise) en fonction de la température (anonyme, 2006). Sa viscosité est très variable, elle peut aller de 0,9 à 5 Pa.s (Pontillon, 1998).

On a intérêt à utiliser de la masse plutôt que de la poudre. La raison en est que, lors du pressage, une partie des arômes va dans la poudre, ce qui est normal, mais une autre partie dans le beurre, et le reste se dégrade et est perdu ou modifié sous l'action de la chaleur et de la pression. L'emploi de masse les sauvegarde tous. Il faut dire aussi que l'utilisation de masse au lieu de poudre conduit à un prix de revient plus élevé, le beurre de cacao remplaçant une quantité équivalente de graisses bon marché (Pontillon, 1998).

La masse de cacao comporte des protéines, de l'eau, des fibres, des minéraux et quelques autres molécules (tableau 1) : Les protéines n'ont aucun effet technologique. La pure pâte de cacao en contient un pourcentage très faible. Dans le chocolat noir, le pourcentage en protéines est inférieur à 5 %. Dans le chocolat au lait, il est de 5 à 8 % car le lait en poudre ajouté en renferme. Le chocolat blanc présente une teneur en protéines identique au chocolat lacté. L'eau présente à l'état de trace dans le chocolat (environ 0,5 %). Les autres composants sont les fibres, les minéraux et deux molécules très importantes au niveau hormonal : la caféine et la théobromine. Leur rôle technologique est faible au contraire de leur rôle nutritionnel (Brochoire, 1998).

te de cacao (Badoer, 2011).

Composition	Pourcentage (%)
Matières grasses	54
Amidon	8
Cellulose	2,5
Autres glucides	17,5
Théobromine	1,1
Caféine	0,4
Acides organiques	2,5
Substances azotées	0,4
Matières minérales	3
Humidité	1,7

#### I.4.2. Le beurre de cacao

L'agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux a défini le beurre de cacao comme étant «la graisse alimentaire obtenue à partir de fèves de cacao avant ou après la torréfaction » (Minifie, 1999).

Le beurre de cacao, dont la couleur est semblable à celle de l'ivoire, a une consistance ferme et friable. Son parfum délicat est très apprécié. Il se dissout dans l'éther, le chlorome et l'alcool bouillant à 90°C (Asiedu, 1991). En dessus de 20°C, c'est un solide jaune pâle cassant et cristallin qui dégage un vague arôme de chocolat; il se conserve très bien grâce à la présence dans l'huile exprimée d'antioxydants naturels solubles dans la graisse (Fao, 1990).

Le beurre de cacao comporte six cristaux (I-VI), les principaux sont  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\beta'$  (tableau 1). Le cristal  $\beta$ , est le plus désirable (en général) (Afoakwa et al, 2007) :

- il est stable dans le temps, alors que naturellement les autres se transformeront pour donner des cristaux  $\beta$ . Cette retransformation inéluctable se traduit par le blanchiment gras du chocolat ;
- il ne fond pas à température ambiante mais dans la bouche ;
- il donne un aspect brillant ;
- il donne une structure cassante et résistante ;
- il se rétracte au froid ce qui facilite le démoulage.

cristaux  $\beta$  dans le chocolat cristallisé et non pas les empêcher le chocolat (Brochoire, 1998).

**Tableau 2** : Point de fusion des cristaux du beurre de cacao ( Afoakwa et al, 2007).

Cristaux du beurre de cacao		Point de fusion (°C)
Form I	$\beta'_2$	16–18
Form II	$\alpha$	21–22
Form III	Mélange	25.5
Form IV	$\beta_1$	27–29
Form V	$\beta_2$	34–35
Form VI	$\beta'_1$	36

Les triglycérides du beurre de cacao ont des acides gras saturés en positions 1,3 et de l'acide oléique à la position 2. Les teneurs en acides gras sont autour de : (35%) de l'acide oléique, (34%) de l'acide stéarique et (26%) de l'acide palmitique, en plus des lipides polaires, des stérols et des tocophérols. La proportion de chacun est en fonction des facteurs tels que les conditions de culture et l'origine. La composition simple des glycérides permet au chocolat de fondre sur une marge de température de 23 à 37 °C ( Afoakwa et al, 2007).

➤ **Le rôle de beurre de cacao dans le chocolat**

- Être le liant des particules solides, apte d'abord à cristalliser pour permettre la mise en forme du produit et son stockage, puis à fondre dans de bonnes conditions lors de la consommation ;
- participer à la qualité aromatique globale, tout d'abord en n'amenant pas de mauvais goût, et ensuite en captant puis restituant une partie des arômes du chocolat (Pontillon, 1998).
- Le beurre de cacao donne un aspect brillant, une dureté et un pouvoir de contraction au chocolat. Plus la proportion de beurre de cacao est élevée dans le chocolat, plus l'aspect des produits finaux sera agréable (Wybauw, 2005).

Le 3 août 2003, la directive européenne 2000/36/CE sur les produits de cacao et de chocolat est entrée en application. Son objet est d'autoriser les fabricants à substituer jusqu'à 5% du beurre de cacao sur le produit fini par une graisse végétale. Etant donné le prix élevé des fèves de cacao, l'opération permet en effet d'abaisser les coûts de fabrication. Mais pour que le consommateur s'y retrouve, la mention claire et visible: « contient des matières grasses végétales en plus du beurre de cacao» est obligatoire. Les « Cocoa Butter Equivalent» (ou CBEs) sont des matières grasses végétales compatibles avec le beurre de cacao. Il s'agit de l'illipé, de l'huile de palme, du sal, du karité, du kokum, du gurgi et des noyaux de mangue (Daverio, 2005).

On entend par sucre blanc, le saccharose purifié, cristallisé obtenu à partir de betterave ou de canne à sucre, il contient au moins 99,6% de saccharose (Apfelbaum et al, 2004).

Au niveau technologique, le sucre ne joue apparemment aucun rôle. Son rôle est gustatif. Il contre l'amertume du chocolat. Néanmoins, la taille de ses cristaux joue un rôle prépondérant dans les propriétés technologiques du chocolat. Acheté sous forme de sucre cristallisé aux industriels fournisseurs, le sucre présente une certaine granulométrie. En chocolaterie, après mélange avec les autres ingrédients et avant l'étape du conchage, le sucre est broyé finement. La granulométrie est abaissée, elle atteint environ 20 micromètres. Cela veut dire que les particules de sucre et de chocolat mesurent en moyenne 2 centièmes de millimètre. Pendant le conchage et grâce à la lécithine, le beurre enrobe tous les grains de sucre. Mais plus les grains sont petits et plus il faut de beurre pour les enrober, ce qui réduit la proportion de beurre de cacao libre dans le chocolat, augmentant sa viscosité. On comprend donc que plus la granulométrie du chocolat est faible et plus celui-ci est visqueux. Inversement un chocolat de ménage, très granuleux, nécessite moins de beurre de cacao qu'un chocolat très fin pour une même fluidité finale (Brochoire, 1998).

Ces dernières années, les chocolats sans saccharose sont devenus très populaires chez les consommateurs et les fabricants en raison de la réduction de leur valeur calorifique, et le fait que ceux-ci sont à la fois non cariogènes et adaptés pour les diabétiques. Les alcools de sucre, notamment le xylitol, le sorbitol, le mannitol et le lactitol sont utilisés pour la fabrication des produits sans sucre. Le remplacement de saccharose avec des alcools de sucre affecte cependant les propriétés rhéologiques et donc les conditions de traitement et la qualité des chocolats (Afoakwa et al, 2007).

#### **1.4.4. Les émulsifiants (la lécithine)**

Les émulsifiants sont utilisés depuis longtemps pour modifier les propriétés d'écoulement du chocolat. En raison de leur structure moléculaire particulière, ces ingrédients tensio-actifs abaissent la tension interfaciale entre la dispersion et la phase continue et, de plus la rhéologie, ils affectent un certain nombre de propriétés, telles que la sensibilité du chocolat à l'humidité et à la température, et son comportement pendant le tempérage. En outre, les émulsifiants peuvent influencer certaines propriétés du chocolat solidifiée comme la susceptibilité au blanchiment gras et à l'oxydation (Schantz et Rohm, 2003).

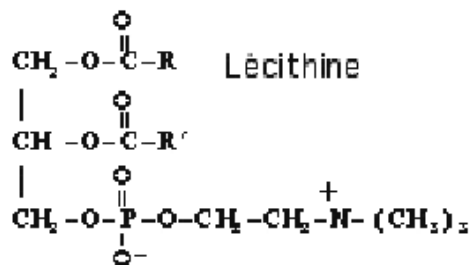
La lécithine, un phospholipide naturel possédant à la fois des propriétés hydrophiles et des propriétés hydrophobes, est l'émulsifiant le plus utilisé dans l'industrie du chocolat (Wiley, 2007).



he en lécithine (6 à 7%), mais celle-ci se rencontre  
les de colza, de graines de tournesol et de maïs. La  
principale source industrielle est dérivée de la fève de soja (1,5 à 2%). La lécithine  
est presque sans saveur ni odeur (Wybauw, 2005).

La lécithine (figure 6) contient plusieurs phosphates constitués de (Dodémont,  
2007) :

- 19 à 24 % d'acides gras palmitiques et stéariques ;
- 9 à 11 % d'acides gras oléiques ;
- 56 à 60 % d'acides gras linoléiques ;
- 6 à 9 % d'acides gras alpha-linoléiques.



**Figure 6** : Formule chimique de la lécithine (Philips et Williams, 1990).

La lécithine joue un rôle fondamental au niveau de la structure du chocolat (Brochoire, 1998). Les groupes hydrophiles de la molécule de lécithine se fixent à l'eau, au sucre, et aux particules solides de cacao présentes dans le chocolat. Les groupes hydrophobes eux-mêmes se fixent au beurre de cacao et aux autres matières grasses comme la graisse du lait. Ce qui réduit à la fois la tension de surface entre le beurre de cacao et les autres matériaux présents, et la viscosité (Wiley, 2007).

La quantité de la lécithine requise se situe dans une gamme étroite de ~0,2 - 0,6%, Cela peut avoir un effet important sur la quantité de beurre de cacao utilisé, en réduisant la teneur en matière grasse finale de chocolat de 5% (Wiley, 2007).

La lécithine est souvent ajoutée lors du mélange ou de conchage. L'ajout à ce stade a l'avantage de réduire l'énergie nécessaire pour pomper le produit à des opérations ultérieures car la viscosité du produit est réduite (Wiley, 2007).

D'autres émulsifiants actifs pour une utilisation potentielle dans la fabrication du chocolat sont, par exemple, les phosphoglycérides fractionnés de la lécithine de soja naturel, les sels d'ammonium de l'acide phosphatidique, et le polyricinoléate de polyglycérol (Schantz et Rohm, 2003).



Le lait en poudre est un ingrédient déterminant du chocolat. Il donne son goût particulier au chocolat au lait et au chocolat blanc.

En fonction du type de chocolat désiré (goûts caractéristiques), on choisira différentes sortes de lait en poudre (Anonyme, 2006) :

- poudre de lait entier obtenue par atomisation (spray) ;
- poudre de lait entier obtenue par dessiccation sur rouleau ;
- "milk crumb" (le produit résiduel d'un processus de dessiccation spécial, par lequel du lait condensé contenant du sucre est séché, de manière à obtenir un arôme crémeux et légèrement caramélisé) ;
- lait en poudre écrémé.

Le lait contient environ 5% de lactose, 5% de matières grasses, 3,5 % de protéines et 0,7% de minéraux. La Matière grasse du lait est dominé par les acides gras saturés, elle est essentiellement liquide (15-20% solide) à la température ambiante, elle adoucit la texture et inhibe le blanchiment gras du chocolat. La matière grasse du lait est sujette à l'oxydation et influe sur la durée de vie (Afoakwa et al, 2007).

#### **I.4.6. Les arômes**

Des substances aromatiques (vanille, cannelle, miel, café ...) viennent compléter la composition (Daverio, 2005). L'aromatisant le plus couramment utilisé dans le chocolat est la vanilline, qui adoucit le goût du cacao et le rend plus agréable au palais (Anonyme, 2006).

La vanille, qui parfois est remplacée par de la vanilline, est ajoutée volontairement par le fabricant dans le chocolat au moment du conchage (Brochoire, 1998).

#### **I.4.6. Autres constituants**

Certaines matières comestibles (fruits secs, noisettes, amandes, riz soufflé, noix de pécan, raisins par exemple) peuvent être ajoutées mais elles ne font pas partie à proprement parler du chocolat. Leur proportion doit être comprise entre 5 et 40% du poids du produit fini si elles sont incorporées en morceaux apparents et séparables, mais ne doit pas dépasser 30% si elles sont ajoutées sous forme pratiquement indiscernable. Cet apport doit être indiqué dans la dénomination des produits finis (Daverio, 2005).

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

Selon sa composition on distingue 4 grandes catégories du chocolat (Barel, 2010) :

**I.5.1. Le chocolat noir** : aussi appelé chocolat fondant ou chocolat amer, est le chocolat à proprement parler. C'est un mélange de cacao et de sucre qui contient généralement 60 à 75 % de cacao (il doit en contenir au minimum 35 %).

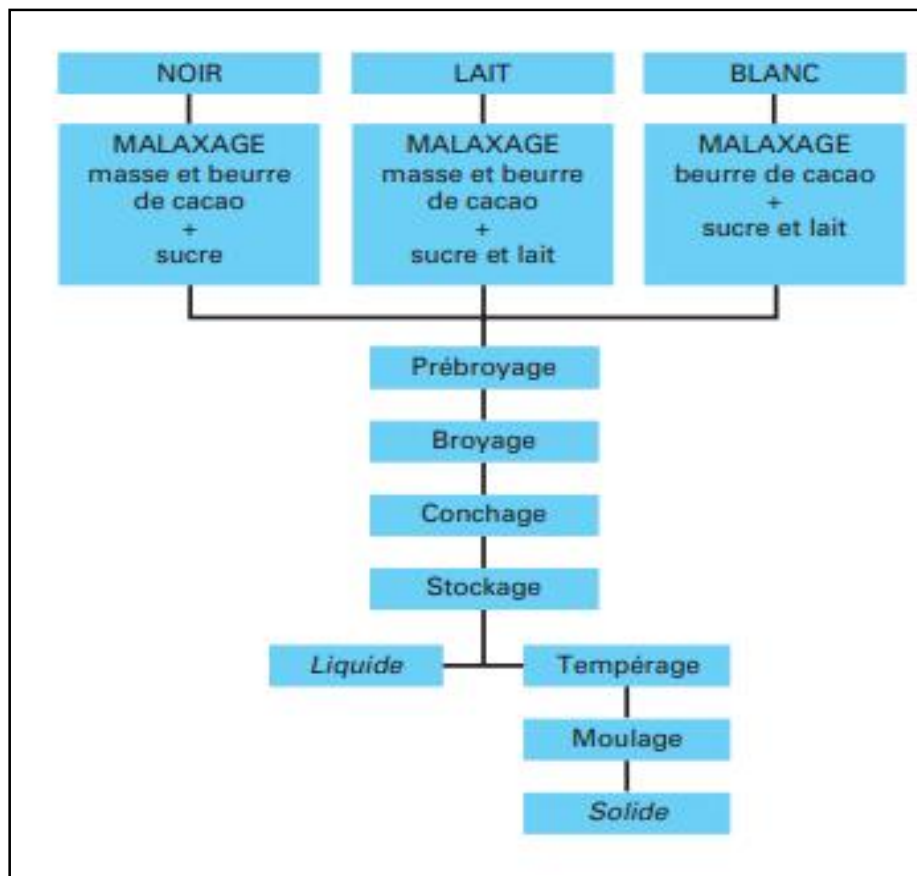
**I.5.2. Le chocolat au lait** : est du chocolat obtenu en ajoutant du lait en poudre. Il contient typiquement un peu moins de 40 % de cacao et il est plus sucré que le chocolat noir.

**I.5.3. Le chocolat blanc** : est une préparation à base de beurre de cacao, additionné de sucre, de lait en poudre et d'arôme. Bien qu'il soit reconnu comme chocolat, il ne contient pas de cacao.

**I.5.4. Le chocolat de couverture** : est un chocolat de très bonne qualité utilisé par les chocolatiers et les pâtisseries comme matière première. Il peut être noir ou au lait, mais contient au moins 32 % de beurre de cacao, ce qui le rend très fluide pour réaliser un enrobage plus fin qu'un enrobage classique.

**I.6. La fabrication du chocolat**

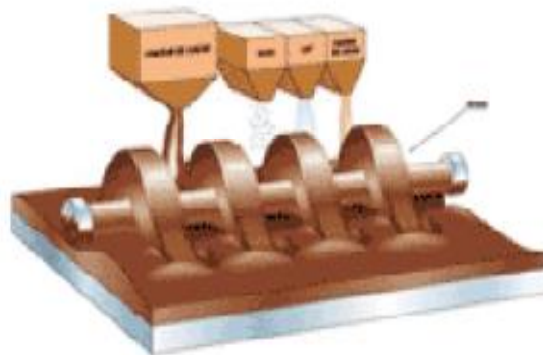
Le schéma de la fabrication du chocolat est donné sur la figure 7.



**Figure 7** : Schéma de la fabrication des chocolats (Pépin, 2002).

Il consiste à mélanger la pâte de cacao au beurre de cacao et au sucre en poudre. Le tout est malaxé dans un mélangeur jusqu'à obtention d'une masse fluide et grasse. On obtient du chocolat noir. Pour fabriquer du chocolat au lait, on ajoute dans le mélangeur du lait en poudre (Daverio,2005).

Le malaxage a lieu dans un pétrin (figure 8), Les pétrins les plus courants sont des cuves à axe horizontal alimentés en partie haute à déchargement par le fond, équipés d'une double enveloppe et d'organes de pesée (De Ginestel, 1998).



**Figure 8:** Mélange des ingrédients dans le pétrin (Thomassey,2010)

Le rôle de cette opération est d'homogénéiser le mélange et de l'amener à la consistance voulue pour le broyage. A ce stade, la masse obtenue possède déjà un goût agréable mais a un aspect granuleux d'où l'objet de l'opération suivante qui permet de réduire la taille des particules à moins de 25 microns (Daverio,2005).

### **I.6.2. Le broyage**

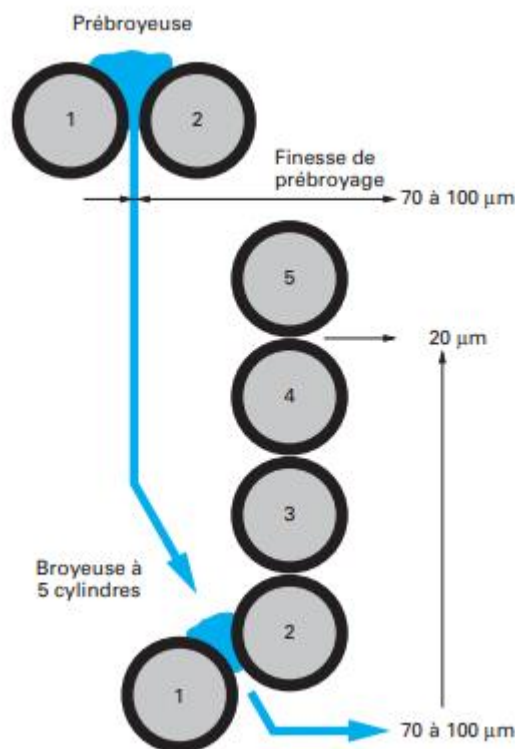
Après le mélange des ingrédients, le produit pâteux est raffiné par le broyage. Le but de cette opération est de raffiner les particules solides de manière à ce qu'elles ne soient plus perceptibles au palais (Anonyme, 2006).Le broyage s'effectue en deux étapes (Pepin, 2002) :

#### **1- Le prébroyage**

Le prébroyage a pour but de réduire la taille des plus gros cristaux en faisant passer le mélange dans un broyeur à deux cylindres. La finesse recherchée à la sortie du cylindre est d'environ 200 µm.

La pâte est réalisée dans des broyeuses.

Ce sont des puissants laminoirs composés de cylindre rotatifs (figure 9). Le mélange est engagé successivement entre les cylindres toujours plus resserrés et qui tournent de plus en plus rapidement. Par ce traitement, les particules s'amenuisent progressivement à la dimension fixée (15 à 35  $\mu\text{m}$  environ). Les particules et agglomérats sont écrasés entre deux cylindres grâce à la pression et au cisaillement. Toutes les particules sont broyées et déformées jusqu'à une taille constante, indépendamment de leur dimension d'origine et de leur dureté. Tous les agglomérats de tailles et de constitution diverses seront dispersés entre les cylindres. Le broyage s'effectue progressivement au fur et à mesure des différents passages entre les cylindres. Cela est une condition importante pour assurer un spectre de finesse étroit, ainsi qu'un bon mouillage et une bonne homogénéisation des particules. Le choix judicieux des vitesses différentielles des cylindres peut assurer libération optimale du beurre contenu dans les particules de lait ou de cacao, ce qui permettra d'atteindre finalement les rhéologies désirées.



**Figure 9** : Schéma d'une broyeuse cinq cylindres (Pepin, 2002).

Le broyage des particules entre les cylindres, assure une part importante de l'aromatization de la pâte de chocolat, la préparant ainsi à un conchage optimal. La formule ainsi que la taille des particules de chacun des composants déterminent en grande partie, les modifications possibles du goût. Les composants porteurs d'arômes

le lait, pâte de noisette et autres sont à mentionner, (Pepin, 2002).

### I.6.3 Le conchage

C'est l'opération primordiale en chocolaterie. Elle s'effectue dans de grandes cuves appelées conches où la pâte de chocolat, chauffée à une température de 50 à 80 °C suivant le type de chocolat est continuellement brassée, malaxée pendant de nombreuses heures (figure 10). On recherche à avoir un maximum de frictions entre les particules solides du cacao et le sucre ; la lubrification est donc l'ennemie. Ce malaxage provoque une forte élévation de la température qui est régulée par un système de refroidissement et conduit à une évaporation d'une partie de l'eau présente (0,5 à 1,5 %). La température de conchage va affecter la rhéologie et les caractéristiques organoleptiques du chocolat. Les effets du conchage sont à la fois mécaniques, physiques et chimiques (Pepin, 2002).

**Effets mécaniques** : les frottements des particules de cacao les unes contre les autres conduisent à l'abrasion des angles, ce qui réduit la dimension des particules. Ces particules polies et arrondies améliorent la plasticité du chocolat, qui devient lisse, brillant et onctueux. D'autres grains, en s'écrasant, peuvent libérer du beurre de cacao, ce qui procure le velouté au chocolat (Pepin, 2002).

**Effets physiques** : le processus physique du conchage se résume à la transformation du produit broyé en une suspension liquide. Le remplissage constitue une phase importante du conchage. La désagglomération des particules après le broyage est obtenue par un mouvement rigoureux du produit, auquel seront appliquées des forces de cisaillement intenses, pour obtenir une masse plastique visqueuse. La dispersion des particules sera accélérée par un ajout de lécithine, contrairement à un ajout de beurre et permettra une économie de temps de 60 à 80 min. Le chocolat devient parfaitement homogène ; en effet, le beurre de cacao enrobe chaque particule de pâte. Le conchage permet d'aérer, d'émulsionner la pâte. Sous l'effet de la chaleur, le taux d'humidité s'abaisse (Pepin, 2002).

**Effets chimiques** : le développement réussi des arômes nécessite un investissement d'énergie au moyen des cisaillements, de la température et du temps. Le développement aromatique se produit au cours de l'élimination des agents volatils tels que les acides acétiques et l'eau. Ce dégazage nécessite un pétrissage intense provoquant la plus grande aération possible. Le dégazage et la réduction d'humidité pourront ainsi être conduits de manière optimale. La perte d'astringence durant le conchage est attribuée à la réduction des composés sphénoliques et des composants volatils tels que les acides, les aldéhydes, les esters et les pyrazines. Le saccharose subit une intervention en fructose ; ces deux phénomènes contribuent à une modification organoleptique (Pepin, 2002).

trois étapes, dans un premier temps, il est effectué pendant cette étape qu'ont lieu les principales modifications physiques. Le conchage se poursuit ensuite sous forme semi-liquide, une partie du beurre de cacao est alors ajoutée. Dans la phase finale, le restant du beurre et de la lécithine est ajouté. Le conchage se termine sous forme liquide (Brydelbout et Fabby, 2007).

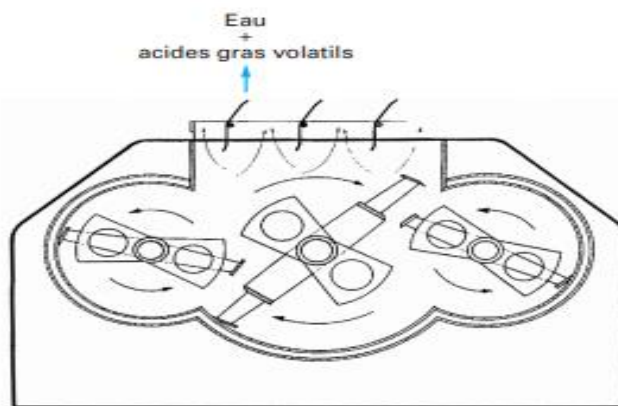


Figure 10 : Schéma d'une conche (Pepin, 2002).

#### I.6.4 Le tempérage

Avant que d'autres étapes de traitement suivent il faut tempérer la pâte de chocolat afin de permettre sa cristallisation et d'obtenir un chocolat brillant, sans grain et pour favoriser la bonne conservation (Gamsriegler, 2002).

Le tempérage consiste à former dans le chocolat le maximum de cristaux  $\beta$ , qui amorceront la cristallisation (Brochoire, 1998).

Pour cela, on refroidit le chocolat jusqu'à environ 27- 29°C. Bien entendu, auparavant on l'a bien chauffé à plus de 44°C, de manière à bien éliminer toutes les formes cristallines. A 27-29°C, de nombreux cristaux se forment, dont les  $\beta$ . Puis on réchauffe légèrement le mélange à 30-32°C de manière à éliminer les cristaux non  $\beta$ . En agitant le mélange, la proportion de  $\beta$  augmente. Enfin on refroidit jusqu'à solidification. Les  $\beta$  grossissent, le chocolat est bien cristallisé. Il peut être utilisé. Il faut noter enfin qu'un chocolat non tempéré provoque en surface le blanchiment gras dû à la migration en surface et à la transformation en  $\beta$  des cristaux non  $\beta$ .

Dans les chocolats au lait, la matière grasse laitière présente une plage de fusion inférieure au beurre de cacao. En conséquence, le tempérage du chocolat au lait est modifié par rapport à celui du noir. On le refroidit à 26-27°C. Puis on le réchauffe à 29-30°C.



s'effectue à 25-26°C, on le réchauffe avant utilisation

### **I.6.5 Le moulage et refroidissement**

Lorsqu'il n'est pas livré liquide, le chocolat doit être moulé pour être entreposé et transporté (De Ginestel, 1998).

Le moulage consiste à verser le chocolat dans des moules pour obtenir des formes particulières. Après les moules passent sur une tapoteuse, ses vibrations expulsent les bulles d'air contenues dans la masse de chocolat. Ensuite les moules sont automatiquement transportés au tunnel de réfrigération où le chocolat est refroidi et figé. Après le procédé du refroidissement les chocolats finis sont séparés des moules (Gamsriegler, 2002).

Le chocolat peut avoir plusieurs formes: On le connaît sous forme liquide, solide, sans ou avec fourrage et en poudre. Étant donné la grande offre de chocolat on a souvent du mal s'orienter (Gamsriegler, 2002).

La forme la plus traditionnelle du moulage est le pain ou la tablette. On trouve une variété de formes de la pépite à la pistole qui permettent une refonte plus facile pour l'utilisateur final (De Ginestel, 1998).

### **I.7 Conservation du chocolat**

En général le chocolat se conserve longtemps, au minimum un an et le chocolat noir même 15 mois. Toutefois il vaut mieux consommer les pralines plus vite à cause du fourrage.

La chaleur et l'humidité sont les ennemis du chocolat. Une température trop élevée fait remonter les cristaux de beurre de cacao à la surface. Même si la chaleur n'a pas d'influence sur le goût elle se répercute sur l'apparence du chocolat. Normalement, une pellicule blanchâtre est le résultat d'une température de garde excessive. Cependant, il n'est pas recommandé de garder le chocolat dans le réfrigérateur puisque l'humidité fait remonter les cristaux du sucre qui se dissolvent puis recristallisent et forment un film gris sur la surface. Ceci n'a pas de conséquences positives sur le goût du produit. Il est recommandé de conserver le chocolat dans un endroit sec entre 10 et 15 °C à l'abri des odeurs environnantes car le chocolat les absorbe aussitôt (Gamsriegler, 2002).

## du chocolat

Un chocolat de qualité est principalement défini en termes de ses caractéristiques sensorielles, qui sont affectés par les traitements du cacao (fermentation, séchage), et les procédés de fabrication. Dans la plupart des cas, la qualité du chocolat est définie par son apparence, son arôme, son goût et sa texture (Afoakwa, 2010).

**1.8.1 L'apparence :** Premièrement le chocolat devrait être lisse et brillant ainsi que d'une belle couleur uniforme (Gamsriegler, 2002). La couleur du chocolat dépend de plusieurs facteurs ainsi le type de fèves de cacao utilisé, mais aussi la quantité de matière sèche de cacao, le conchage (par oxydation crée lors du brassage), la finesse des particules (Khodorowsky et Hérivé, 2008).

**1.8.2 Le goût :** La qualité de matière sèche de cacao influencera directement l'intensité du goût, ceci bien entendu est en rapport avec la quantité du sucre dans la formule. Le conchage, n'est pas sans influence sur le goût du produit fini. Dans le cas du chocolat au lait, le type de lait intervient également, mais la quantité du lait déterminera la volenté de la couverture (Fry, 2007).

**1.8.3 L'odeur :** est en partie déterminée par le choix des fèves ou du mélange de fève Le degré de torréfaction sera très important (Fry, 2007). L'essentiel de l'arôme cacao est crée lors de la torréfaction, à partir des « précurseurs d'arôme », eux-mêmes apparus durant la fermentation et, à un moindre degré, pendant le séchage (Pontillon, 1998).

### 1.8.4 La texture

Après un entreposage d'au moins 24 h à une température de 15 – 20°C au maximum, un chocolat de bonne qualité doit craquer lorsqu'on le rompt, et la cassure doit présenter une structure fine. Une surface granuleuse indique soit une détérioration due à la chaleur, soit une mauvaise cristallisation de la phase lipidique (Khodorowsky et Hérivé, 2008).

Un chocolat de bonne qualité fond dans la bouche, tout en étant solide à la température ambiante. Et pour que les matières premières coulent correctement dans les tuyaux et que les produits semi-finis versent facilement dans des moules, ils doivent posséder certaines propriétés rhéologiques (Anonyme 2, 2010)

Dans l'industrie chocolatière, les propriétés d'écoulement du chocolat sont très surveillées. Les usines de fabrication de chocolat sont de taille de plus en plus importante et la maîtrise de la viscosité des produits revêt donc une importance grandissante. Avec des conduites de 200 m ou plus, il est impératif que les pompes (diamètre, puissance, conduites) soient conçues pour fournir l'écoulement souhaité. De plus, le produit fini doit répondre à des critères stricts selon qu'il soit destiné à la consommation en tablette ou au moulage (Pépin, 2002).





*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **CHAPITRE II**

## **ETUDE RHEOLOGIQUE DES ALIMENTS**

La rhéologie (le terme fut inventé par Eugène Bingham en 1928, à partir du mot grec ρεῖν, signifiant écoulement) est ainsi la science qui étudie et décrit l'écoulement, la déformation et la rupture de corps sous l'effet d'une contrainte. Dans ce contexte, les corps peuvent être des liquides, des solides ou des matériaux pulvérulents. 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. Les propriétés rhéologiques sont également à l'origine des comportements perçus lors de l'évaluation sensorielle de la texture.

Dans le domaine alimentaire, la texture est considérée essentiellement comme une propriété sensorielle et regroupe un grand nombre de termes ; citons, entre autres, la tendreté pour la viande, l'onctuosité ou la fermeté pour des fromages, l'aspect collant pour des pâtes ou encore les caractères craquant, friable, dur et croustillant pour des biscuits.

Néanmoins, des méthodes de mesure des paramètres texturaux autres que sensorielles se sont développées. Elles relèvent de la rhéologie.

L'application de certains principes fondamentaux de mécanique et de rhéologie permet de mieux comprendre les comportements mécaniques de ces substances, à l'état naturel ou lorsqu'on les modifie par un procédé de texturation (Scher, 2006).

## II.2. Rhéologie des fluides alimentaires

**II.2.1. Définition d'un fluide :** un matériau qui s'écoule de lui-même, sous l'effet de son propre poids et qui est incapable de récupérer seul sa forme initiale (Scher, 2006).

### II.2.2. Loi de la viscosité

La première, la plus répandue et la plus « palpable » des caractéristiques d'un fluide, en matière d'écoulement, est sa viscosité. La viscosité exprime la résistance d'un fluide à entrer en mouvement, lorsque celui-ci est soumis à un écoulement uniforme et sans turbulence. Plus la viscosité d'un fluide est élevée, plus sa capacité à s'écouler diminue. Ainsi, un fluide compris entre deux surfaces planes dont l'une seulement est au repos (étalement de peinture, de crème, de confiture etc.) sera soumis à un mouvement dit de cisaillement schématisé par la Figure 11. En considérant l'hypothèse de non-glissement aux parois, la couche de liquide en contact avec la surface fixe aura une vitesse nulle. Au contraire, la couche en contact avec la paroi mobile sera entraînée la même vitesse que celle-ci. Entre ces deux vitesses, le fluide évoluera en fines couches ayant chacune une vitesse

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

instaurera alors un gradient de vitesse ( $\dot{\gamma}$ ) (ou de cisaillement ou vitesse de déformation) entre ces différentes couches, qui est défini comme étant, la dérivée par rapport au temps de la déformation que subit un milieu continu soumis à des contraintes (Caubet, 2010). Il est défini par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

Où,  $\dot{\gamma}$  a les dimensions de l'inverse du temps ( $s^{-1}$ ) (Couarraze et Grossiord, 2000).

De plus, entre ces couches de liquide naissent des forces de frottement qui, une fois rapportées à l'unité de surface, sont appelées contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) (figure 11) (Caubet, 2010). On la définit par :

$$\tau = \frac{df}{ds}$$

Où,  $\tau$  est exprimée en Pascal (Couarraze et Grossiord, 2000).

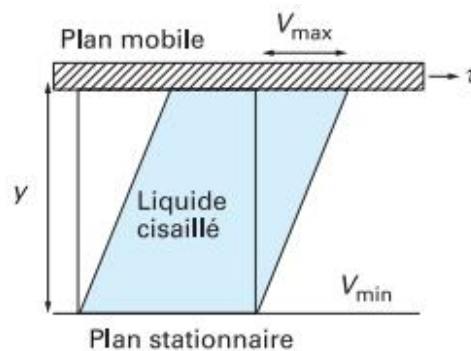


Figure 11 : Écoulement entre deux plans parallèles (Scher, 2006).

La corrélation entre le gradient de vitesse et la contrainte tangentielle définit la capacité d'écoulement d'un fluide. Celle-ci est exprimée selon un diagramme dans lequel  $\tau$  (contrainte tangentielle) est portée en ordonnée et  $\dot{\gamma}$  (gradient de vitesse) en abscisse. Ce diagramme s'appelle **courbe d'écoulement**. Un autre diagramme est également très courant ; il s'agit du diagramme appelé **courbe de viscosité** où la viscosité est portée en fonction du gradient de vitesse (Scher, 2006).

## ue des fluides

L'état fluide est caractérisé par trois principaux types de comportement suivant la nature des paramètres qui influent sur l'aspect de la courbe d'écoulement (Scher, 2006):

- Les fluides indépendants du temps ;
- Les fluides dépendants du temps ;
- Les fluides viscoélastiques.

### II.2.3.1 Fluides indépendants du temps

#### 1. Fluides newtoniens (parfaits)

Ces fluides sont caractérisés par une relation proportionnelle entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement. Cette relation s'écrit :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Où,  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide (Pa.s). La viscosité dynamique est indépendante de la vitesse de cisaillement. Elle ne dépend que de la température, la pression et la nature du fluide (Rebiha, 2004).

Les fluides newtoniens sont relativement nombreux dans les industries alimentaires : lait, jus de fruits naturels, blanc d'œuf stabilisé, la plupart des miels... (Scher, 2006).

#### 2. fluides non newtoniens indépendants du temps

Les fluides non newtoniens au comportement indépendant du temps sont caractérisés par une relation générale de type :

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Un des comportements pratiques les plus intéressants des fluides non newtoniens est leur relation non linéaire entre contrainte et vitesse de déformation. La structure interne du fluide est complexe et peut être influencée par l'écoulement (Guazzelli, 2011).

Aussi, pour différents taux de cisaillement, différentes viscosités sont observées. Par conséquent, la viscosité apparente est utilisée pour les fluides non-newtoniens. Le symbole  $\eta_a$  est souvent utilisé pour représenter la viscosité apparente pour la distinguer de la viscosité purement Newtonien ( $\mu$ ). Le rapport de la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement correspondant est donc appelée viscosité apparente à un tel taux de cisaillement (Sahin et Sumnu, 2006).

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

Comportement newtonien d'un fluide sont liées à la taille des particules. Dans la phase continue, leur forme, leur nature et leur aptitude à la déformation ou bien la réactivité physico-chimique de la phase continue notamment dans le cas des suspensions colloïdales (Rebiha, 2004).

- Certains fluides sont appelés **Les fluides à seuil** (appelés aussi **fluides plastiques**) : pour lesquels une certaine valeur de contrainte ( $\tau_0$ ) doit être dépassée pour que ceux-ci entrent en écoulement. Une fois cette contrainte dépassée, leur comportement sera généralement newtonien (fluides de Bingham) (Caubet S, 2010).

Il existe des corps qui ont généralement un seuil d'écoulement, mais qui au-delà ne présentent pas un comportement Newtonien, ils sont appelés corps de Casson, ils ont un comportement plastique non-idéal (Lock, 1960).

Le tableau 2 récapitule les principales lois d'écoulement rhéologiques utilisées pour décrire le comportement des fluides à seuil.

**Tableau 3** : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique (Guillemin, 2008).

Auteur	Loi de comportement	Paramètre
BINGHAM	$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$	$\tau_0$ : contrainte critique (Pa) $\eta_p$ : viscosité plastique (Pa.s)
HERSCHEL-BULKLEY	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$	$\tau_0$ : contrainte critique (Pa) $K$ : indice de consistance (Pa.s <sup>n</sup> ) $n$ : indice d'écoulement (sans dimension)
CASSON	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_p \dot{\gamma}}$	$\tau_0$ : contrainte critique (Pa) $\eta_p$ : viscosité plastique (Pa.s)

Le seuil d'écoulement est associé à la cohésion existant entre les particules tassées les unes contre les autres au sein de la suspension concentrée. Il est défini comme la contrainte nécessaire pour engendrer une rupture de cette cohésion et engendrer l'écoulement (Espinosa-Brisset, 2012).

Exemples : le chocolat fondu, certaines graisses, les margarines sont des substances typiques qui présentent un seuil de plasticité (Scher, 2006).

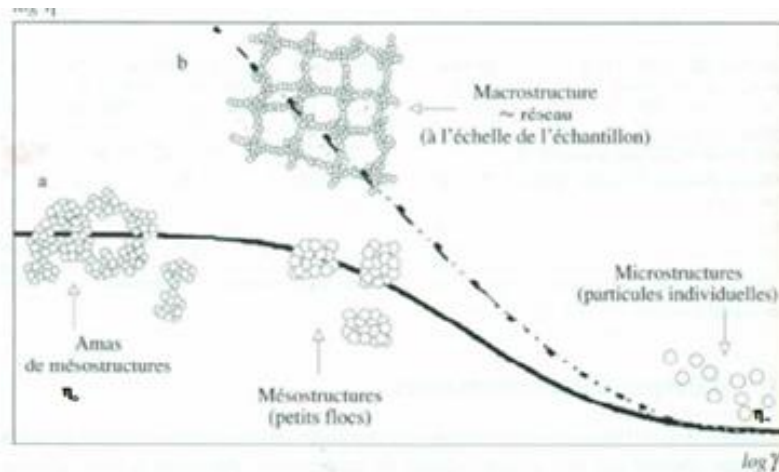
- La plus part des fluides sont **rhéofluidifiants (pseudoplastiques)** pour lesquels la viscosité diminuera avec l'augmentation du gradient de vitesse. Les exemples les plus courants sont le yaourt, la mayonnaise, la peinture de bonne qualité (qui ne s'écoule plus une fois appliquée) etc (Caubet, 2010).

on dit « loi d'Ostwald De Waele » :

$$\tau = k \dot{\gamma}^n$$

Où, n, indice d'écoulement, est exposant à déterminer mais toujours inférieur à 1 et qui traduit l'écart avec le comportement newtonien pour lequel n=1, k est indice de consistance (Rebiha, 2004).

Ce caractère rhéofuidifiant typique des suspensions concentrées est une conséquence des réorganisations structurales au sein du système en écoulement (figure 12) : lorsque le système est cisailé, la structure du réseau est d'abord cassée, puis les agrégats sont réduits en plus petits fragments. Ainsi quand le taux de cisaillement augmente, le nombre de particules agrégées diminue, ce qui conduit au comportement rhéofuidifiant de la suspension . De même, à taux de cisaillement élevé, il est supposé que les agrégats d'origine ont été complètement décomposés et que avec le haut niveau de cisaillement, les agrégats sont désagrégés et alignés. Dans ces conditions l'écoulement devient newtonien (Espinosa-Brisset , 2012 )



**Figure 12** : Courbe d'écoulement complète d'un fluide non newtonien, avec l'interprétation structurale lors du cisaillement (Espinosa-Brisset, 2012).

- Quelques fluides sont **rhéoépaississants (dilatants)**: ils obéissent également à la loi d'Ostwald mais avec n>1, autrement dit, la viscosité apparente croît avec la vitesse de cisaillement de cisaillement. Ce type de comportement a été initialement mis en évidence sur des suspensions de forte teneur en solide. Au repos, le volume libre entre les particules est minimal ; il est occupé par le liquide suspendant qui enrobe chaque particule d'une fine pellicule qui joue le rôle de lubrifiant. Au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente, le liquide est insuffisant pour combler tout le volume interstitiel, les tensions de cisaillement provoquant peu à peu la rupture de ces films, et aux frottements solides – liquides initiaux, se substituent alors des frottements solide – solide qui entraîne une augmentation de la viscosité apparente de la suspension (Steffe, 1996).

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

présentant un écoulement dilatant sont généralement à forte concentration (> 50 %) de petites particules défloculées. L'empois d'amidon et certains miels en sont des exemples (Scher, 2006).

Les figures suivantes montrent les courbes d'écoulement et de viscosité des fluides indépendants du temps :

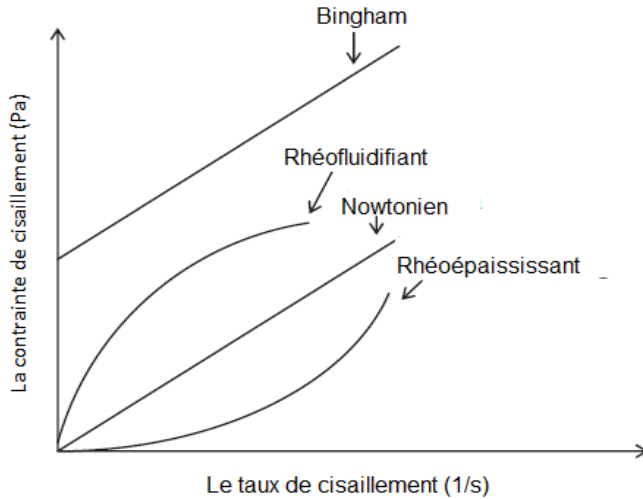


Figure 13 : Courbes d'écoulement des fluides indépendants du temps (Sahin et Sumnu 2006)

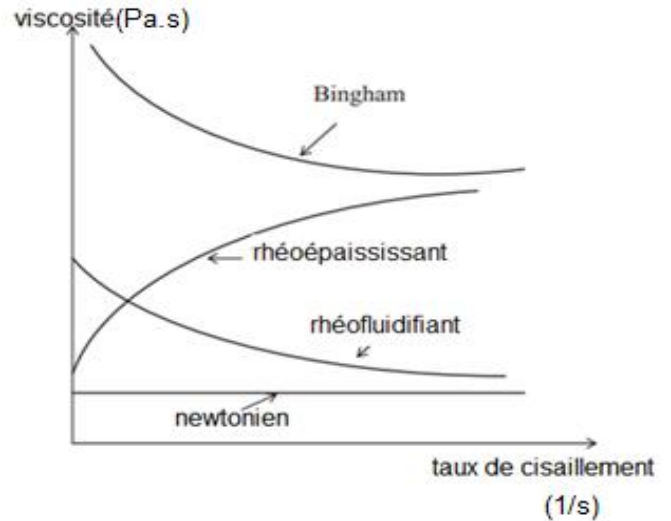


Figure 14: Courbes de viscosité des fluides indépendants du temps (Sahin et Sumnu 2006)

### II.2.3.2. Fluides non newtoniens au comportement dépendant du temps

Il existe des fluides bien plus complexes pouvant présenter un mélange, une succession de différents comportements. D'autre part, nous avons jusqu'alors sous entendu que ces comportements étaient indépendant du temps, de l'histoire mécanique du matériau. Or, ce n'est pas forcément le cas. Certains fluides verront leur viscosité diminuer dans le temps s'ils sont soumis à un gradient de vitesse (ou à une contrainte) constante (Caubet, 2010). Tout corps dont la viscosité apparente a tendance à décroître dans le temps quand on lui applique une contrainte ou une vitesse de cisaillement constante (figure 15) est dit **thixotrope**, pourvu qu'après suppression du cisaillement et un temps de repos suffisant, sa structure initiale se régénère (Courraze et Grossiord, 2000).

La thixotropie reste un phénomène rhéologique de grande importance industrielle, elle est recherchée surtout lorsqu'on peut avoir un fluide qui se liquéfie lorsqu'on le met en œuvre et qui se raidit lorsqu'on le stocke ou on le laisse au repos, pour croître sa stabilité (Courraze et Grossiord, 1991).



Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

ie est le phénomène inverse de la thixotropie, pour illement donné), la viscosité apparente augmente avec le temps (figure 15) (Rebiha, 2004 ). La rhéopexie est un phénomène extrêmement complexe qui n'a guère été étudié. Dans ce type de fluides, il apparaît qu'un faible cisaillement est susceptible de favoriser la restructuration du produit (Scher , 2006).

Exemples : émulsions d'eau dans de l'huile ou cristallisation du plâtre à faible cisaillement (Scher , 2006).

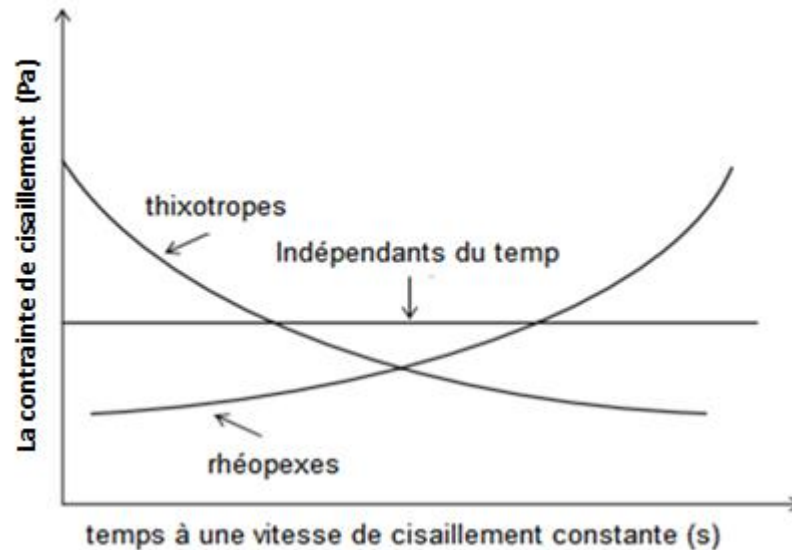


Figure 15 : Comportement des fluides dépendants du temps (Sahin et Sumnu, 2006)

### II.2.3.1 Comportement Viscoélastique

Ils possèdent à la fois les propriétés visqueuses d'un liquide et les propriétés élastiques d'un solide.

Le caractère viscoélastique est un comportement non Newtonien très important et très fréquent dans les solutions de polymères. La réponse du fluide à une déformation présente à la fois un aspect élastique (contrainte proportionnelle à la déformation) et un aspect visqueux (contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation)( Benazouz-Ahmed , 2010).

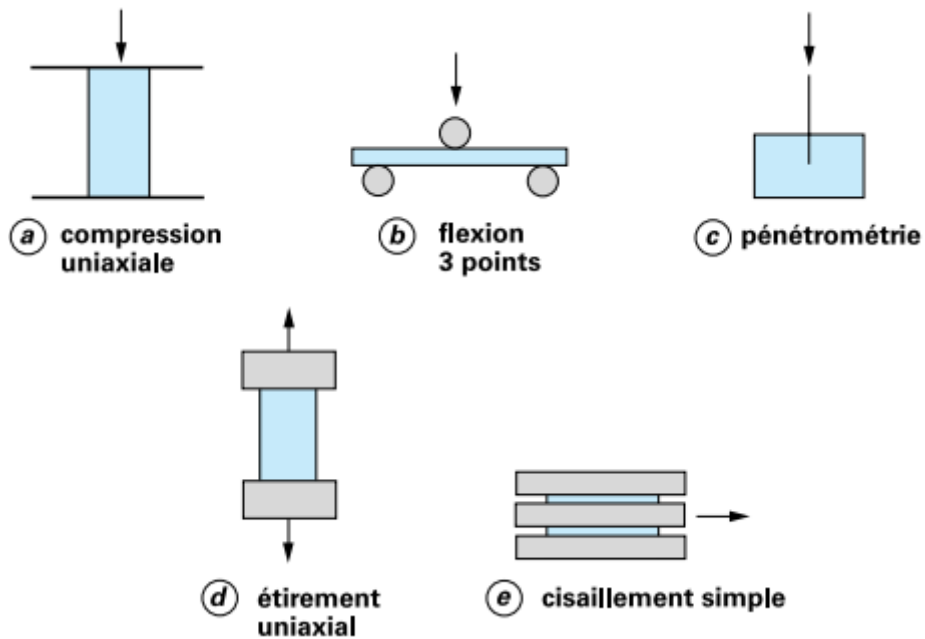
Ce type de comportement peut être caractérisé à partir d'expériences de fluage ou de relaxation, ou par des essais dynamiques où une contrainte (ou une déformation) sinusoïdale est appliquée ( Chkir, 2011 ).



**entaires**

Afin de caractériser le comportement rhéologique de solides alimentaires, on soumet généralement ceux-ci à l'application d'une contrainte (force par unité de surface) ou, plus rarement, d'un étirement, et l'on enregistre la manière dont ils se déforment. Les enregistrements contrainte-déformation obtenus caractérisent, en fonction des conditions expérimentales, le comportement rhéologique de l'aliment (Scher, 2006).

Les principales techniques de mesure des propriétés rhéologiques des solides alimentaires sont portées dans la figure 16 :



**Figure 16 :** Exemples de tests rhéologiques réalisés à partir de machines de compression ou d'étirement (Scher, 2006)

**a) Test de compression (compressimètres)**

Le test de compression consiste à mesurer la résistance que présente l'aliment à la compression qui lui est appliquée ; il permet également de déterminer le module d'élasticité, qui correspond au rapport de la contrainte appliquée à la déformation de l'échantillon (Scher, 2006).

**b) Test de flexion**

Le déplacement enregistré au centre de l'échantillon sous l'action d'une force peut permettre de calculer le module d'élasticité ou encore, plus simplement, la résistance à la pliure. Des essais ont déjà été réalisés sur des barres de chewing-gum, des pains plats ou des bananes (Scher, 2006).

Ce test est certainement le plus ancien test de mesure de la texture. Il consiste à faire pénétrer dans l'aliment une sonde ou une aiguille et à mesurer la force nécessaire pour atteindre une certaine profondeur. Ce test est très utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques de produits tels que les fruits et les légumes, mais également pour suivre l'évolution texturale de fromages, mesurer la tendreté de carcasses bovines (Scher, 2006).

#### **d) Test d'étirement (tension uniaxiale)**

Ce test consiste à mesurer la force nécessaire pour étirer un échantillon d'une longueur donnée. Cette méthode est difficilement applicable aux produits agricoles et alimentaires car se posent les problèmes de la fixation de l'échantillon pour pouvoir exercer une traction. Néanmoins, dans le cas de la viande, ce test peut permettre d'apprécier séparément la résistance mécanique des fibres musculaires et celle du tissu conjonctif. D'autres essais ont été réalisés sur la peau de cerises et des tranches de pommes de terre (Scher, 2006).

#### **e) Test de cisaillement**

De nombreux instruments sont constitués d'une ou de plusieurs lames coupantes qui cisailent le produit alimentaire dans des conditions standardisées. Dans ce test, la force maximale exigée ainsi que le travail fourni pour le cisaillement sont considérés comme un indice de fermeté, de dureté ou de tendreté.

### **II.4. Rhéologie des gels**

Un gel est un système biphasique solide-liquide thermodynamiquement stable constitué d'un double réseau interpénétré continu tridimensionnel, l'un solide et l'autre liquide ( Chkir, 2011 ).

L'aptitude à la gélification est une propriété fonctionnelle de nombreuses protéines. Elles jouent un rôle majeur dans la préparation d'un grand nombre d'aliments (produits laitiers, blanc d'œuf coagulé, gélatine, pâtes boulangères, etc.). La gélification protéique est utilisée non seulement pour former des textures spécifiques, mais aussi pour améliorer l'absorption d'eau, l'épaississement, la liaison des particules ou stabiliser une émulsion (Scher , 2006)

Les gels comme tous les systèmes polymérisés, présentent un comportement viscoélastique. Les mesures viscoélastiques en régime harmonique à faible déformation sont les plus appropriées. Pour des gels, le rapport entre la contrainte et la déformation à n'importe quel temps est indépendant de l'amplitude de la contrainte ou de la déformation appliquée ; le comportement viscoélastique est ainsi linéaire ( Chkir, 2011 ; Guichard et al 2012 ).

terminer la force nécessaire pour rompre un gel. Les auteurs de montrer que la force de rupture mesurée par compression dépendait du nombre de liaisons dans le réseau (Chkir, 2011 ).

## II.5. Rhéologie des poudres alimentaires

Selon la norme NF X 11-630, une poudre est un ensemble de particules dont les dimensions sont habituellement inférieures à 1 mm.

Les milieux particulaires ou granulaires présentent une variété de comportements qui les rendent inclassables parmi les trois états de la matière habituels, à savoir solide, liquide et gazeux. Ainsi, une poudre peut résister à une déformation de caractère non permanent quand la contrainte n'est pas trop élevée, mais ce n'est pas un solide ; une poudre peut s'écouler sous certaines conditions, mais ce n'est pas un liquide ; une poudre peut être comprimée, parfois de façon importante, mais ce n'est pas un gaz. Cette ambivalence a fait dire à certains auteurs qu'il s'agit là d'un quatrième état de la matière, situé entre le solide et le liquide.

L'aptitude à l'écoulement ou « coulabilité » est une propriété d'usage essentielle des poudres, tant pour l'utilisateur industriel que pour le consommateur. Elle dépend de l'origine de celles-ci, ainsi que de leurs modes d'obtention qui peuvent être très différents en industrie agroalimentaire.

La coulabilité est à la fois une propriété intrinsèque de la poudre, essentielle pour le dosage et la manutention par exemple, ainsi qu'une grandeur synthétique, exprimant les effets combinés de la contrainte, de la granulométrie, de la teneur en eau, du temps de séjour dans un silo (Scher, 2006).

## Propriétés du chocolat

Le chocolat est une suspension de particules solides de cacao et de sucre (et de lait pour le chocolat au lait et blanc) dans un fluide newtonien, le beurre de cacao. Les particules solides sont assimilées à des sphères et leur taille est définie par le diamètre équivalent défini comme le diamètre qu'aurait une particule parfaitement sphérique de même volume. Dans le chocolat, les particules solides ont un diamètre équivalent de quelques dizaines de micromètres

Le comportement rhéologique des suspensions de particules qui ont un diamètre équivalent supérieur à 1  $\mu\text{m}$  dans un fluide newtonien dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la taille et la forme des particules, la distribution en taille des particules, la fraction volumique de solide, les interactions entre particules, la masse volumique du solide et du fluide et la viscosité du milieu continu. Ces fluides peuvent adopter différents comportements rhéologiques (Becu, 2003).

Dans le cas du chocolat, la rhéologie a deux aspects principaux, qui sont la viscosité et la limite d'écoulement du produit liquide (ou la contrainte seuil) (Anonyme 2, 2010).

La limite d'écoulement se rapporte à l'énergie nécessaire au chocolat pour commencer l'écoulement, elle caractérise sa capacité au moulage ou à l'enrobage. La viscosité apparente est reliée à la viscosité du chocolat à des vitesses de cisaillement élevées et, par conséquent, donne une indication sur le comportement du chocolat lors de pompage (Do et al, 2010).

Principaux défauts pouvant être présentés du fait de mauvaises caractéristiques rhéologiques :

- Bulles, irrégularité de la surface libre du fait d'une limite d'écoulement trop forte (pontillon, 1998). Des bords trop fins pour les pralines moulées et des pieds pour les pralines immergées sont causés par une limite d'écoulement trop basse (Wybauw, 2005).
- Mauvais remplissage des moules, mauvais dessins sont causés par une viscosité trop élevée (pontillon, 1998). Si la viscosité est trop faible, le poids du chocolat sur les bonbons enrobés sera également trop faible (Gonçalves et Lannes, 2010).

olat dans la bouche est également affectée par la propriétés d'écoulement incorrectes peuvent être perçus par le consommateur (Gonçalves et Lannes, 2010).

Le tableau (tableau 4) suivant permet de définir certaines gammes de viscosité et de limites d'écoulement des chocolats et couvertures selon les usages auxquels ils sont destinés.

**Tableau 4** : Gammes de viscosité et de limites d'écoulement des chocolats et couvertures selon les usages (pontillon, 1998).

Type d'utilisation	viscosité en Pa.s	Limite d'écoulement en Pa
Tablettes (100 – 200) g	3 – 4	10 – 15
Moulages	1,2 – 1,5	3 – 8
Enrobages (couche standard)	1,5 – 2	6 – 8
Trempage de bâtonnets de biscuit	0,9 – 1,0	3 - 5

Parmi les autres aspects impliqués sont les propriétés relatives à la texture et aux aspects sensoriels du chocolat. Les propriétés de texture du chocolat sont (Anonyme 2, 2010):

- la dureté dans la bouche, c'est à dire la force requise pour écraser le chocolat avec les dents et la langue ;
- la dissolubilité ; la manière dont le chocolat fond complètement dans la bouche ;
- la souplesse ; le degré de rugosité ou de gravelosité que l'on ressent lorsque le chocolat fond dans la bouche ;
- le niveau de collage; le degré auquel le mélange de chocolat fondu et de salive colle à la langue et au palais.



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **PARTIE**

# **EXPIREMENALE**



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **CHAPITRE I**

## **MATERIEL ET METHODES**



L'objectif de notre travail réside dans l'étude de l'influence de la composition en masse de cacao, beurre de cacao et de la lécithine de soja sur la rhéologie du chocolat noir. Pour le faire, on doit réaliser plusieurs mélanges en variant les composants ou en variant tout simplement leur dosage.

Afin de minimiser le nombre d'essai qu'il faut préparer, il y a nécessité de l'établissement d'un plan d'expérience. L'utilisation de cette méthode nous permet de modéliser et optimiser les paramètres rhéologiques.

Après l'établissement du plan d'expérience à l'aide d'un logiciel de formulation, on procède à la préparation des essais en fixant la quantité de sucre et les paramètres en relation avec le processus de fabrication, ensuite on procède aux mesures rhéologiques de nos essais.

### **I. 1. Matériel**

Le chocolat noir des différents essais préparés est produit à partir de la matière première suivante :

- La masse du cacao ;
- Le beurre du cacao ;
- Le sucre ;
- La lécithine de soja.

La matière première utilisée est fournie par la chocolaterie BIMO ainsi la masse et le beurre de cacao sont issues d'un mélange de fève de cacao qui a subi les procédures de concassage, torréfaction et broyage au sein de la même entreprise.

Les caractéristiques physicochimiques de la matière première ont été effectuées au laboratoire des analyses physicochimiques de BIMO.

Le sucre utilisé dans toutes les préparations a subi un pré-broyage jusqu'à un diamètre compris entre 180 à 190 $\mu$ m.

## la caractérisation de la matière première

**I.2.1.1. Détermination de la teneur en beurre de la masse de cacao:** extraction simple au soxhlet selon la norme (NF EN ISO 734-1) (AFNOR, 2007)

### ○ Principe

L'aliment solide est pesé et placé dans une capsule de cellulose. L'échantillon est extrait en continu par de l'éther de pétrole à ébullition (P.E. 40 °C) qui dissout graduellement la matière grasse. Le solvant contenant la matière grasse retourne dans le ballon par déversements successifs causés par un effet de siphon dans le coude latéral. Comme seul le solvant peut s'évaporer de nouveau, la matière grasse s'accumule dans le ballon jusqu'à ce que l'extraction soit complète. Une fois l'extraction terminée, l'éther est évaporé, généralement sur un évaporateur rotatif, et la matière grasse est pesée. Les capsules de cellulose sont perméables au solvant et à la matière grasse qui y est dissoute. Ces capsules sont jetables.

### ○ Mode opératoire

- Peser 10 g de la masse de cacao dans la cartouche d'extraction en cellulose, et couvrir avec du coton.
- monter la cartouche d'extraction dans le réservoir de soxhlet.
- Remplir le ballon avec l'éther de pétrole et surmonter l'extracteur d'un réfrigérant.
- Le beurre est récupéré au fur et à mesure dans le ballon, l'opération durera 24 heures (on peut aller jusqu'à 72°C).
- Placer le ballon dans l'étuve réglé entre 70 et 80°C pendant 30 min, puis dans le dessiccateur jusqu'à refroidissement à température ambiante (30 à 40 min).
- Repeser le ballon avec son contenu.

### ○ Expression des résultats

$$\text{Pourcentage du beurre(\%)} = (m_2 - m_1)/m \times 100$$

**m<sub>1</sub>** : masse du ballon vide (g)

**m<sub>2</sub>** : masse du ballon contenant le beurre (g)

**m** : poids de la prise d'essai (g)

## dité de la masse de cacao

Dessiccation dans un humidimètre à 100°C pendant 10 min. cet appareil comporte une coupelle de mesure posée sur un plateau de balance, et au dessus de laquelle se trouve la source de chaleur, la plupart du temps une ampoule infrarouge (Cros, 1998)

### ○ **Mode opératoire**

- Placer le plateau vide et le poids de 10 g sur le support du plateau inférieur.
- Débloquer la balance en manœuvrant le bouton gauche vers le bas, l'éclairage des deux cadrans est enclenché.
- Sur le cadran droit, l'aiguille doit se trouver sur la ligne (10 g).
- Puis fixer l'index du cadran de gauche sur le trait du milieu.
- Ramener l'aiguille du cadran droit au zéro (0)
- Retirer le poids de 10g.
- Peser l'échantillon à analyser jusqu'à atteindre 10 g.
- Vérifier que l'index du cadran de gauche se trouve de nouveau sur le trait du milieu.
- Par la suite, déposer le plateau et le produit sur l'une des plaques chauffantes.
- Régler la minuterie : 10 min à 100°C.
- Amener le plateau avec le produit séché sur le porte plateau supérieure à l'aide du bouton de réglage du haut en tournant à droite ou à gauche selon le cas.
- Amener l'index sur le trait du milieu du cadran gradué de gauche en tournant de réglage de droite.
- A la fin lire la teneur d'humidité en % directement sur l'écran droit.

### **2.1.2.3. Détermination de l'acidité du beurre de cacao : selon la norme (NE. 1. 2.97, 1988)**

#### ○ **Principe**

Une quantité connue de beurre de cacao est dissoute dans un mélange d'alcool éthylique et de dioxyde d'éthyle. On neutralise à la burette en présence de phénolphtaléine.

... g de la matière grasse sous forme liquide dans un 1<sup>er</sup> bécher de 250 ml,

- Mettre 10 ml de KOH (0,1N) dans une beurette.
- Dans une fiole de 100ml, mettre le mélange (Ether di-éthylique 2V et Ethanol 1V) jusqu'au trait de jauge, et verser le mélange dans un 2<sup>ème</sup> bécher vide, en ajoutant quelques gouttes de phénolphaléine.
- Titrer goutte à goutte la solution avec le KOH jusqu'à ce que la solution vire à la couleur « rose ». Le volume de KOH utilisé pour le titrage est appelé  $V_1$ .
- Par la suite, verser la solution titrée dans le bécher contenant la matière grasse.
- A la fin, titrer de nouveau le mélange jusqu'à ce que la solution vire à la couleur « rose » ; le volume de KOH utilisé pour le titrage est appelé  $V_2$ .

- **Expression des résultats**

$$AC \% = (282 \times N \times \Delta V) / m$$

**282** = Masse molaire de l'acide oléique

**N** = Normalité du KOH

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

**m** = Masse en gramme de la matière grasse.

#### **I.2.1.4. Détermination du point de fusion du beurre de cacao : selon la norme (ISO 6321:2002)**

- **Principe**

Le point de fusion est la température à laquelle une matière grasse solidifiée dans un tube capillaire se ramollit jusqu'à tel point qu'elle remonte dans le tube.

Principe : Il est basé sur le passage de la matière grasse de l'état solide à l'état liquide sous l'effet de la chaleur, à une certaine température.

- **Mode opératoire**

Remplir deux tubes capillaires sur une longueur de 1 à 2 cm par immersion dans la graisse un peu molle, puis les fixer au réservoir du thermomètre et introduire ce dernier, ainsi que les tubes dans un bécher contenant une eau à 10°C et mis sur une plaque chauffante. Par la suite, chauffer et Observer attentivement et noter la température à laquelle le bloc de graisse commence à remonter dans les tubes.

## d'expérience

Les plans d'expériences permettent l'étude de nombreux facteurs tout en maintenant un nombre raisonnable d'essais. Cette approche offre de nombreux avantages tels que la diminution du nombre d'essais, l'augmentation du nombre de facteurs à étudier, la détection d'interactions entre les paramètres. Elle permet également une optimisation, une meilleure précision et une modélisation des résultats. Plusieurs types de plan d'expériences sont mis à la disposition de l'expérimentateur selon le besoin. Dans notre travail nous allons utiliser les plans des mélanges dont les facteurs influençant sur les repenses sont les proportions des composants du mélange.

### I.2.2.1. Problème à résoudre

On doit établir un modèle pour chaque propriété rhéologique tout en étudiant l'effet de chaque composant sur ces propriétés, ensuite on doit trouver le taux de chaque composant qui permet d'établir une formule pour un chocolat de bonnes propriétés rhéologiques qui peut aboutir au chocolat satisfaisant de point de vue organoleptique (chocolat de bonne qualité).

### I.2.2.2. Définition des réponses

On qualifie de réponse la grandeur qui est observée pour chaque expérience réalisée. Dans notre cas, sont les paramètres rhéologiques ressortis du modèle rhéologique choisi.

### I.2.2.3 Choix de la stratégie d'expérimentation

Les travaux de SCHEFFE (1958) sont les bases de la stratégie expérimentale appliquée aux mélanges, ils sont et restent l'origine de beaucoup d'applications (Droesbeke et al, 1997). Dans ces plans, les valeurs des facteurs étudiés sont des proportions de chaque constituant d'un mélange. Leur somme est donc égale à 1.

Les réseaux de SCHEFFE présentent plusieurs avantages :

- Construction facile et nombre d'expériences minimales ce qui permet un gain de temps et de matière très considérable.
- Ils contiennent autant de points qu'il y'a de coefficients dans le polynôme correspondant.
- Test de validité du modèle par l'induction de points tests.
- Modèle prévisionnel permettant d'obtenir une prévision de la réponse avec variance minimale.

Un facteur est un facteur externe à la formulation, variable, obligatoirement contrôlable, susceptible d'influer sur la réponse observée.

Vu que la préparation des formules déroule directement sur le plan de processus de fabrication de la chocolaterie (sur le terrain), nous avons distingué trois types de facteurs :

- a) Facteurs externes à la formulation (liés au procès) :
  - La température de pétrin ;
  - Le temps de pétrissage ;
  - La vitesse de premier cylindre de la broyeuse ;
  - La vitesse de dernier cylindre de la broyeuse ;
  - La température des cylindres de la broyeuse ;
  - Les pressions exercées entre les cylindres de la broyeuse ;
  - La température de la conche ;
  - La vitesse de la conche ;
  - Temps de conchage à sec et de conchage liquide.
  
- b) Les facteurs externes à la formulation (liés aux caractéristiques des facteurs internes à la formulation) :
  - La finesse de sucre (taille des cristaux de sucre) pré-broyé et après l'étape de broyage ;
  - La teneur en matière grasse de la masse de cacao ;
  - La finesse de la masse de cacao.
  
- c) Facteurs interne à la formulation (composants)
  - Le sucre ;
  - La masse de cacao ;
  - Le beurre de cacao ;
  - La lécithine de soja.

Les facteurs retenus sont ceux liés à la composition de chocolat noir (facteurs internes à la formulation), ces derniers sont considérés comme étant des facteurs clé de la formulation.

Les facteurs externes à la formulation liés aux procès de fabrication, pouvant influencer sur les réponses étudiées, pour cette raison ces facteurs sont maintenus fixes pour toutes les formules préparées.

On ce qui concerne la catégorie de facteurs externes à la formulation et qui sont liés aux caractéristiques des facteurs retenus, ceux-ci peuvent influencer aussi sur les réponses et bien sûr ils seront maintenus fixes ou bien contrôlés.

onnés sont : la masse de cacao, le beurre de cacao, est à noter que le dernier facteur (sucre) est à figer.

#### I.2.2.4. Niveaux retenus des facteurs

Les niveaux des facteurs désignent en fait les quantités minimales et maximales qu'on pourrait ajouter au niveau de notre formulation. Ces valeurs sont déterminées selon les commodités de l'appareillage (la broyeuses, et la conche) et la réglementation en vigueur et elles sont montrées dans le tableau suivant :

**Tableau 5** : les contraintes de la modélisation

Les facteurs	Les niveaux
Sucre	$x_4 = 0,41$
Masse de cacao	$0,56 \leq x_1 \leq 0,30$
Beurre de cacao	$0,025 \leq x_2 \leq 0,289$
La lécithine de soja	$0,001 \leq x_3 \leq 0,005$
$\sum$ facteurs	$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$

Il est à noter qu'en plus de beurre de cacao rajouté, la masse de cacao peut contenir plus de 50% de beurre de cacao.

#### I.2.2.5. plan expérimental et modèle adopté

Les plans des mélanges permettent de choisir les mélanges à tester de façon à avoir les meilleures estimations des coefficients du modèle, ce sont des plans optimaux. Un plan D- optimal permet de couvrir la totalité d'un domaine quelle que soit sa forme. Nous remarquons qu'à l'exception du centre, les points choisis sont situés aux limites du domaine.

Le modèle mathématique qui semble correspondre à notre objectif est celui du premier degré. Il s'agit d'un modèle linéaire. Le modèle peut s'écrire donc de la façon suivante :

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

Où:

$x_1$  : la teneur en masse de cacao

$x_2$  : la teneur en berre de cacao

$x_3$  : la teneur en lécithine.

$a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  sont les coefficients inconnus que l'on cherche à déterminer.

La validité du modèle obtenu est vérifiée par des tests statistiques de signification.



## expériences

LES facteurs et les niveaux sélectionnés sont introduits dans le logiciel Design-Expert 7. L'introduction des différents facteurs avec leurs niveaux a donné les recettes ou les formules illustrées dans le tableau suivant :

**Tableau 6** : la matrice d'expériences du plan D-optimal pour les mélanges beurre de cacao – masse de cacao – sucre – lécithine.

Numéro d'essai	Ordre d'élaboration	Masse de cacao	Beurre de cacao	Lécithine	Sucre
1	10	0,458	0,131	0,001	0,410
2	3	0,560	0,025	0,005	0,410
3	14	0,300	0,289	0,001	0,410
4	16	0,560	0,027	0,003	0,410
5	11	0,362	0,227	0,001	0,410
6	13	0,559	0,030	0,001	0,410
7	6	0,560	0,027	0,003	0,410
8	4	0,429	0,160	0,001	0,410
9	8	0,536	0,049	0,005	0,410
10	9	0,385	0,200	0,005	0,410
11	7	0,495	0,090	0,005	0,410
12	2	0,559	0,030	0,001	0,410
13	15	0,338	0,247	0,005	0,410
14	1	0,300	0,289	0,001	0,410
15	5	0,338	0,247	0,005	0,410
16	12	0,560	0,027	0,003	0,410

### I.2.3. Fabrication du produit

La préparation des essais a été réalisée à l'échelle industrielle avec des pâtes de 537 Kg, en respectant les mêmes conditions de fabrication du chocolat noir de l'unité de BIMO. Le sucre, la masse de cacao sont mélangés au niveau de pétrin à une température de 45°C. Ensuite une quantité de beurre de cacao est additionnée au mélange dans le pétrin, la quantité ajoutée doit nous permettre d'obtenir une pâte molle qui peut passer par la suite entre les cylindres de la broyeuse sans aucun problème. Après le pétrissage la pâte passe dans la broyeuse, puis à la conche pour subir un conchage à sec pendant 17 heures. A la fin de conchage à sec, nous

beurre de cacao et la lécithine et nous actionnons le liquide qui dure encore 2 heures.

Le diagramme illustré dans la figure (17) explique les étapes de fabrication des essais ainsi que tous les paramètres en relation avec le procès.

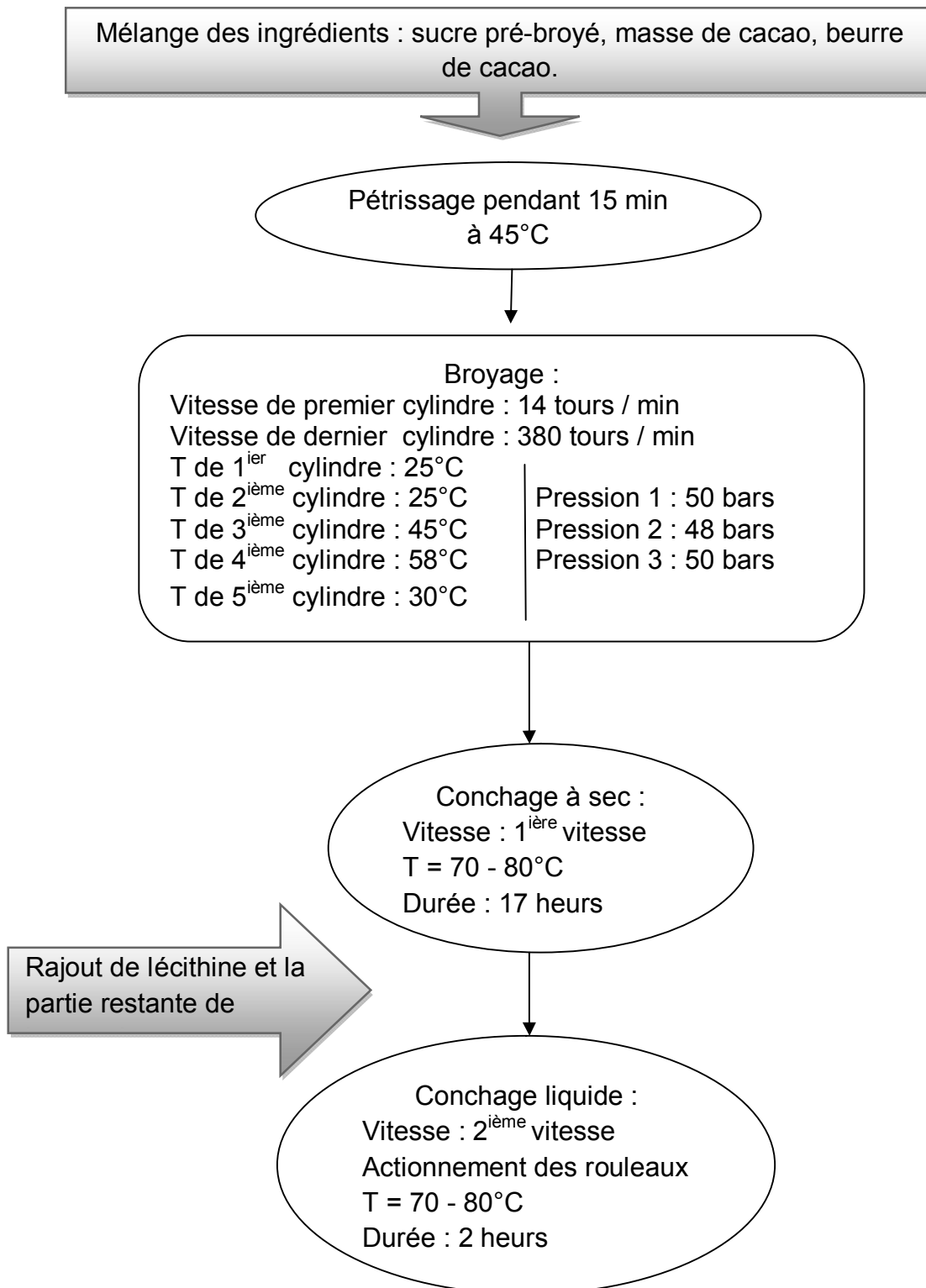


Figure 17: Diagramme de fabrication des essais établi à l'échelle industrielle

## la caractérisation des essais

Notre objectif est d'étudier l'influence de la masse de cacao, du beurre de cacao et de la lécithine sur la rhéologie du chocolat noir. Avant d'entamer les mesures rhéologiques de nos essais, nous avons procédé au début à la mesure de la finesse de tous les essais du fait de sa grande influence sur la rhéologie. Ces mesures ont été effectuées dans le laboratoire des analyses physicochimique de BIMO.

### I.2.4.1. Mesure de la taille des cristaux de sucre (la finesse du chocolat)

Ce critère est mesuré à l'aide d'un microscope doté d'une règle (graille J., 2003).

#### ○ Mode opératoire

- Mettre dans un mortier une petite cuillère de masse de cacao plus une petite quantité d'huile de vaseline
- A l'aide du pilon, mélanger soigneusement en effectuant des tours circulaires de façon à homogénéiser le mélange
- Après avoir étalonné l'appareil avec une règle spécifique à l'étalonnage, déposer une goutte du mélange sur une lamelle puis observer au microscope.

#### ○ Expression des résultats

$$\text{Finesse} = G \times 1000 / 46$$

**G** : nombre des divisions des particules

### I.2.4.2. L'étude de comportement rhéologique

Il existe un grand nombre de rhéomètres mais nous nous limitons ici à la description de celui utilisé dans ce travail. Le choix de la méthode de mesure dépend essentiellement des grandeurs à déterminer. Dans notre cas, l'objectif est la modélisation du comportement rhéologique du chocolat qui nous permettra de faire ressortir les paramètres rhéologiques caractérisant les essais.

Nous utilisons le principe des rhéomètres rotatifs. Un gradient de vitesse est imposé entre une surface solide immobile, le stator, et une surface solide en rotation, le rotor. Le fluide à étudier se situe entre le rotor et le stator. Une vitesse de rotation est imposée au rotor et le couple de rotation résultant est mesuré. L'écoulement qui s'établit, s'il est laminaire, est ce qu'on appelle un écoulement de Couette. Il est alors possible, selon la géométrie du système, de relier le couple et la contrainte de cisaillement. Par exemple, pour un système de cylindres coaxiaux, l'expression de la contrainte de cisaillement en fonction du couple mesuré est la suivante (Becu, 2003):

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 L}$$

Où :

$\tau$  : est la contrainte de cisaillement au rayon  $r$  au sein du fluide [Pa] ;

$M$  : est le couple [N.m] ;

$r$  : est le rayon d'une couche de fluide [m] ;

$L$  : est la longueur des cylindres [m].

Dans ce travail, une géométrie à cylindres coaxiaux est utilisée (principe de la couette). Cette géométrie permet d'avoir un gradient de vitesse pratiquement constant le long de l'entrefer. Un viscosimètre rotatif type METTLER RM180 Rheomat est utilisé. Le rhéomètre est thermostaté par un bain marée (voir annexe 3), il possède plusieurs types de système de mesure. Il s'agit en fait de cylindres coaxiaux, nous avons utilisé le Z 2 qui convient mieux à l'état de notre fluide.

- **Préparation des échantillons et mesure** (Becu, 2003)

Avant de commencer la mesure, il faut préalablement éliminer toutes formes cristallines. Pour ce faire, le chocolat est fondu au bain marie à 50 °C. Quand le chocolat est complètement liquide, nous le versons dans le viscosimètre dont la température du bain thermostaté est à 40 °C. Un cisaillement de 5 s<sup>-1</sup> est imposé pendant 5 minutes afin d'homogénéiser la température au sein de l'échantillon. Le cisaillement est ensuite arrêté pendant 10 secondes, ensuite nous commençons la mesure.



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **CHAPITRE II**

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## II.1.1 Résultats de la caractérisation de la matière première

### II.1.2 La masse de cacao

Le tableau (7) montre les résultats des analyses physico-chimiques de la masse de cacao :

**Tableau 7** : Résultats des analyses physico-chimiques de la masse de cacao.

	Teneur en beurre (%)	Humidité (%)
Les résultats	55,04	0,8
Normes FCC (2002)	48 -56	≤ 1,3

#### a) La teneur en beurre

Le résultat obtenu lors de la mesure de la teneur en beurre de la masse de cacao a montré une conformité aux normes FCC (2000). Selon prior (2003) cette teneur est variable en fonction du type des grains et du mode d'extraction.

Des études récentes (Do et *al*, 2010) ont montrées qu'un chocolat formulé avec du cacao solide de haute teneur en matières grasses contenant moins de graisses libres ce qui influe sur la viscosité du chocolat à l'état fondu, étant donné que seule la matière grasse libre contribue à l'aptitude du chocolat à l'écoulement.

#### b) L'humidité

D'après le résultat obtenu, on observe clairement que l'humidité de la masse de cacao est conforme aux normes FCC (2000).

Selon Pontillon (1998), l'humidité de la masse joue un rôle intéressant. Elle agit à deux titres :

- En tant que composé volatil, elle va s'évaporer partiellement lors du conchage à sec, aidant à l'élimination des arômes indésirables. Pour cette raison, certains fabricants préfèrent des masses à plus de 2,5% d'humidité ;
- En tant que participant à la viscosité de la masse, par là à la texture du produit mis à concher à sec, et donc l'efficacité de cette phase de la fabrication.

éliminée pendant le conchage. Le chocolat fondu a une humidité de 0,5-1,5%, principalement dans les particules solides de cacao, cette humidité n'affecte pas l'écoulement du chocolat. Cependant, à une humidité très élevée les particules de sucre forment des grumeaux graveleux, et l'humidité à la surface des particules de sucre augmente la friction et la viscosité apparente. De plus, pour chaque 0,3% de l'humidité supplémentaire dans le chocolat à la fin du conchage, le fabricant doit ajouter un supplément de graisse de 1%, et parce que la graisse est la principale composante la plus coûteuse dans le chocolat, il est important que l'eau «libre» soit retirée autant que possible. L'humidité de 4 - 3% augmente nettement la viscosité et la contrainte seuil du chocolat (Afoakwa et al, 2007).

### II.2.2 Le beurre de cacao

Les résultats des analyses physicochimiques du beurre de cacao sont représentés par le tableau 8 :

**Tableau 8** : Résultats des analyses physico-chimiques du beurre de cacao.

	L'acidité (%)	Le point de fusion (°C)
Les résultats	1,97	33
Normes FCC (2002)	0,5 – 1,75	30 - 35

#### a) L'acidité

L'acidité du beurre de cacao obtenue est légèrement supérieure aux normes de FCC (2000), cette acidité correspond à un pourcentage normal d'acide oléique (33 – 35%) et n'affecte pas la qualité du produit.

L'acidité est représentative de l'altération hydraulique du beurre qui se développe dans le fruit (fève de cacao), du fait de la fragilité génétique de certains variétés mais aussi du fait, de l'influence de précautions prises lors de la récolte ou bien le stockage (Anonyme, 1999).

Selon Multon et Martin (1980), une acidité normale des graisses provient des grains sains et de bonne qualité et sont stockés dans de bonnes conditions d'humidité et de température, ce qui donnera par la suite des produits finis de bonne qualité. Le taux d'acidité de la matière grasse est un indice de bonne conservation des graines.



[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

Le point de fusion de beurre de cacao utilisé dans les préparations est conforme aux normes FCC (2000).

Le point de fusion est lié au génotype de la plante et à la pureté du beurre de cacao. Ce point ne doit pas être supérieur à 43°C pour une graisse alimentaire, car elle serait mal digérée (Viola, 1970)

Selon Graille (2003), le point de fusion des triglycérides est lié à celui des acides gras constitutifs, les triacylglycérols sont formés d'acides gras à courte chaîne et ceux formés d'acides gras mono et polyinsaturés, ont un point plus bas, contrairement à ceux qui ont du mélange des chaînes longues et saturées, donc le point de fusion des corps gras dépend du mélange des triacylglycérols .

### cre (la finesse du chocolat)

La finesse peut avoir une grande influence sur les propriétés rhéologiques du chocolat, pour cela nous avons procédé à la mesure de la taille des cristaux de sucre de tous les essais et qui est présenté dans le tableau suivant (tableau 9) :

**Tableau 9** : La taille des cristaux de sucre pour chaque essai donné.

Numéro d'essai	La taille des cristaux de sucre ( $\mu\text{m}$ )
1	43
2	21
3	43
4	51
5	32
6	32,59
7	32,54
8	43
9	21
10	43
11	32
12	65,19
13	32,59
14	86,95
15	21,73
16	43,47

Nous remarquons une très grande variation de la finesse entre les différents essais et même entre les essais présentant les mêmes pourcentages en ingrédients, dont les essais (n°3), (n°6), (n°15), qui possèdent une finesse très inférieure par rapport, respectivement, aux essais (n°14), (n°12) et (n°13). Également, l'essai (n°4) qui possède une finesse supérieure à l'essai (n°16), qui possède à son tour une finesse supérieure à l'essai (n°7). Ces différences entre les essais qui se ressemblent peuvent être attribuées à la variation de la quantité du beurre introduite dans le pétrin avant de passer dans la broyeuse.

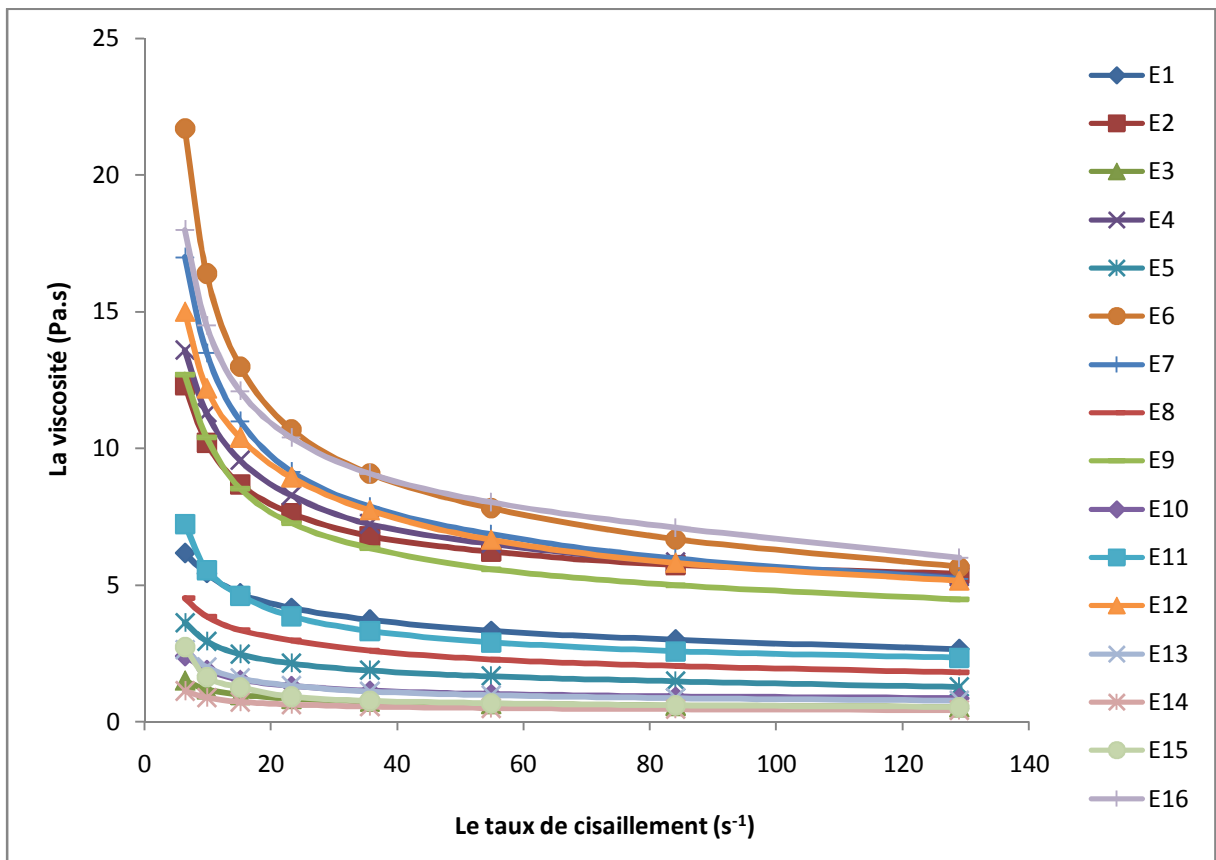
Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

**des essais**

Lors des mesures rhéologique, le rhéomètre nous donne les valeurs de la viscosité ainsi que de la contrainte de cisaillement à chaque taux de cisaillement ce qui nous permet de tracer les courbes de viscosité et d'écoulement de chaque essai.

**II.3.1. Les courbes de viscosité des essais**

La figure suivante montre les courbes de viscosité des différents essais, elles sont exprimées par la viscosité (Pa.s) en fonction de taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ) :



**Figure 18** : Courbes de viscosités des essais.

La figure (18) met en évidence, pour un essai donné, une diminution de la viscosité apparente avec l'augmentation de taux de cisaillement, Ce comportement est typiquement non newtonien rhéofluidifiant.

Le chocolat est une suspension concentrée. Le chocolat liquide a un comportement non newtonien. Les particules de sucre et de cacao sont recouvertes d'une couche de phospholipides. A courte distance il existe une interaction entre ces particules. Elles forment une microstructure qui se rompt lorsque le cisaillement augmente. C'est ce phénomène qui est à l'origine du comportement rhéofluidifiant du

il n'y a pas de théorie définissant la nature de ces

La variation de la viscosité entre les différents essais est remarquable, les essais (n°6), (n°16), (n°7), (n°12), (n°4) et (n°2) sont par ordre décroissant les essais les plus visqueux par une forte teneur en masse de cacao (~ 56%). D'après Becu (2003), Pour un grand nombre de suspensions de particules inertes, la viscosité augmente avec la fraction volumique de solide.

La viscosité diminue au fur et à mesure que la teneur en masse de cacao diminue et la teneur en beurre de cacao augmente jusqu'aux essais (n°3) et (n°14), qui présentent la teneur la plus élevée en beurre de cacao. (Fernandes et al, 2012) déclare que, le beurre de cacao présente un comportement rhéologique newtonien et la réduction de sa viscosité diminue la viscosité du chocolat.

Certains essais présentent la même formule, comme par exemple, l'essai (n°13) avec l'essai (n°15), l'essai (n°14) avec l'essai (n°3) et (n°6) avec (n°12), leurs courbes de viscosité présentent une légère variation qui peut être attribuée à d'autres facteurs liés à la formulation comme la finesse du chocolat ou des facteurs incontrôlables pendant la préparation des essais ou bien pendant la mesure de la viscosité. Selon Becu (2003), plusieurs facteurs affectent les mesures de viscosité et peuvent expliquer les différences observées entre les essais. La viscosité dépend de la température suivant une loi exponentielle et une incertitude de 1°C peut entraîner une variation de 8% de la viscosité apparente à un gradient de vitesse de 40 s<sup>-1</sup>.

### II.3.2. Courbes d'écoulement des essais et leur modélisation

Les courbes d'écoulement de chaque essai sont exprimées par la contrainte de cisaillement (Pa) en fonction du taux de cisaillement (s<sup>-1</sup>) et sont représentées ci-dessous. La modélisation des courbes s'effectue par le modèle rhéologique de Casson.

Le modèle de Casson est le modèle standard pour modéliser les courbes d'écoulement du chocolat. Le modèle de Casson s'écrit comme suit :

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \eta_p^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$$

$\tau$  : La contrainte de cisaillement (Pa).

$\eta_p$  : viscosité plastique de Casson (Pa.s).

$\tau_c$  : La contrainte seuil (Pa).

$\dot{\gamma}$  : Le taux de cisaillement (s<sup>-1</sup>).

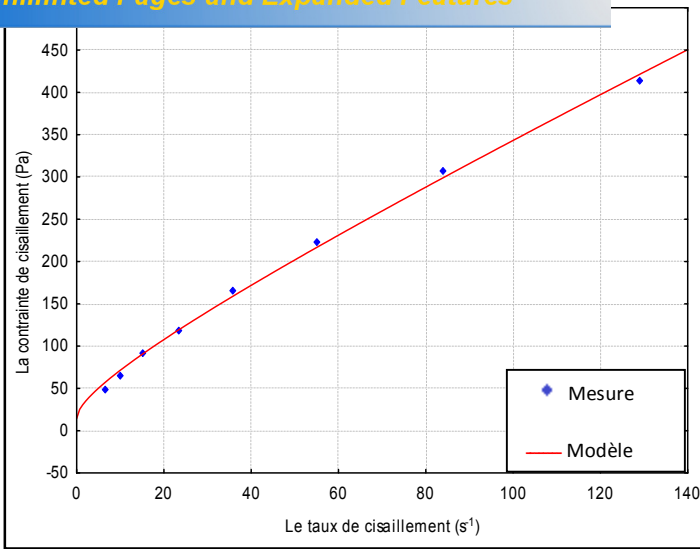


Figure 19 : Courbe d'écoulement de l'essai (1) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

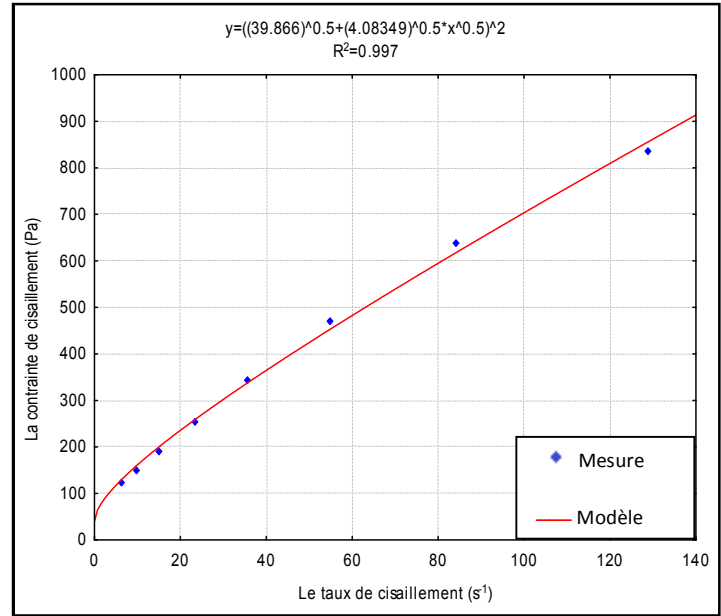


Figure 20 : Courbe d'écoulement de l'essai (2) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

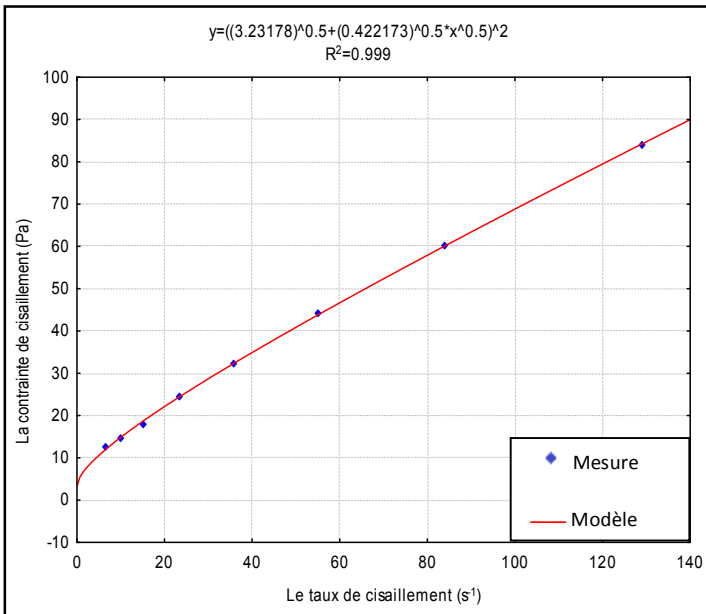


Figure 21 : Courbe d'écoulement de l'essai (3) et modèle d'ajustement du modèle de Casson

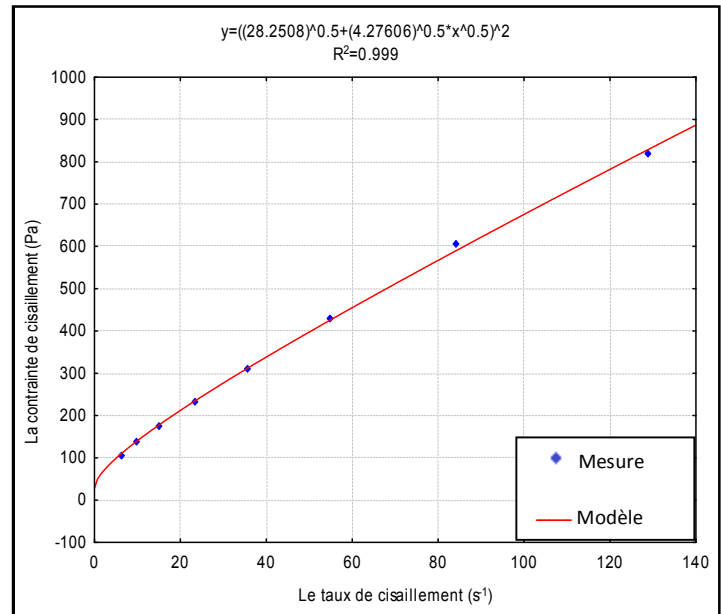


Figure 22 : Courbe d'écoulement de l'essai (4) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

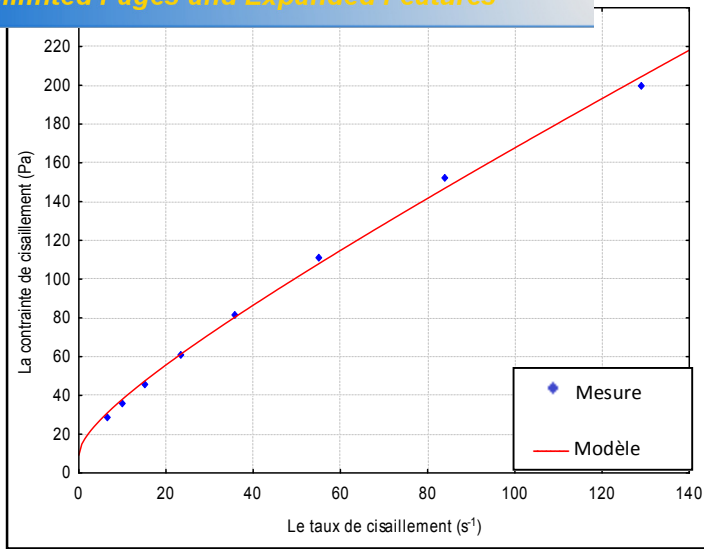


Figure 23 : Courbe d'écoulement de l'essai (5) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

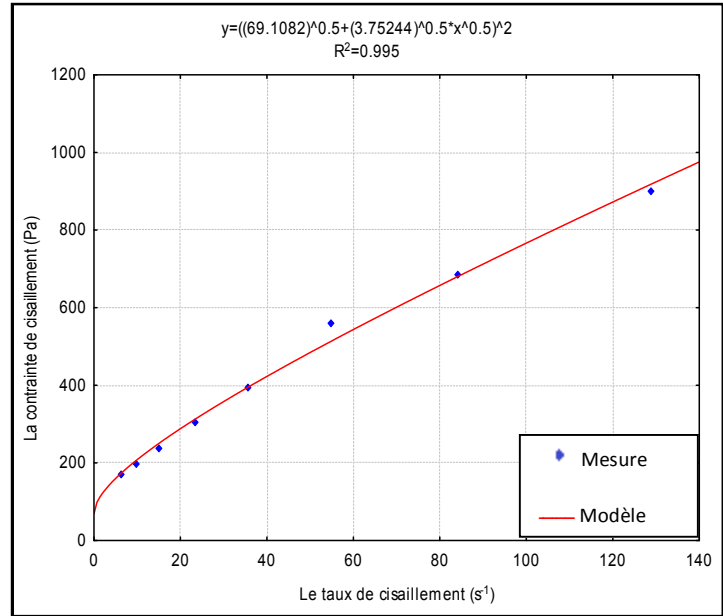


Figure 24 : Courbe d'écoulement de l'essai (6) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

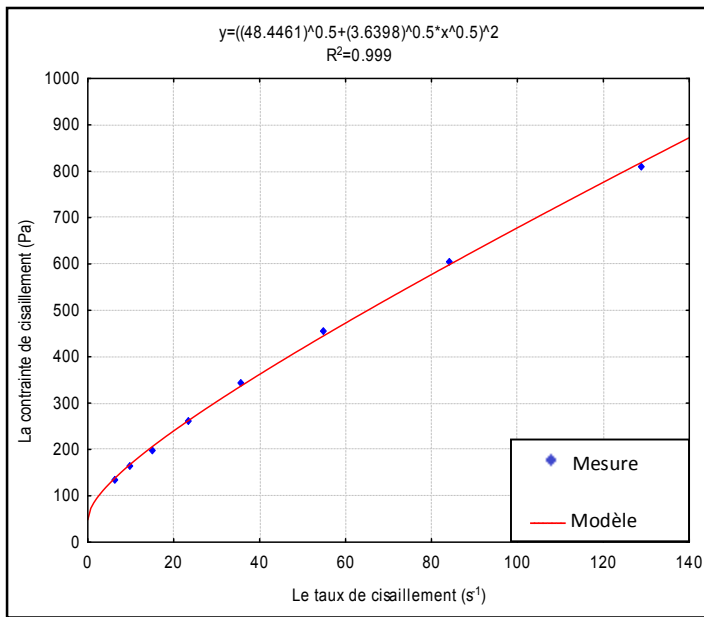


Figure 25 : Courbe d'écoulement de l'essai (7) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

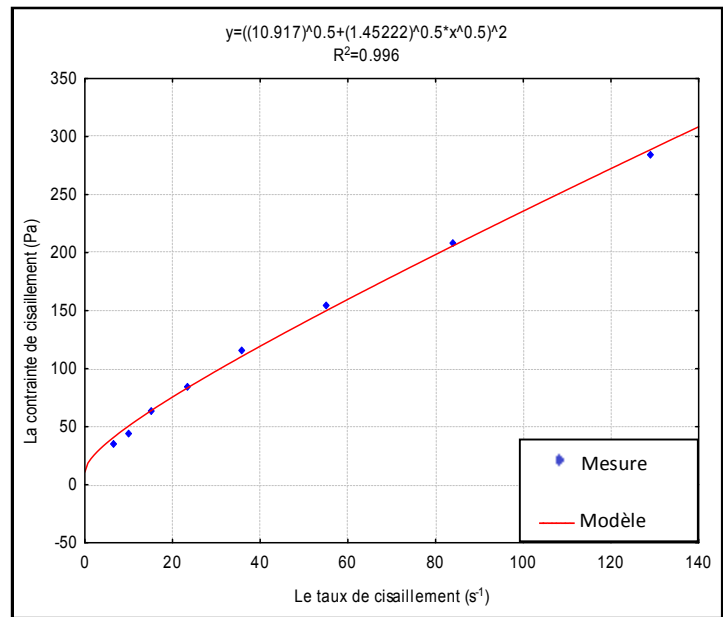


Figure 26 : Courbe d'écoulement de l'essai (8) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

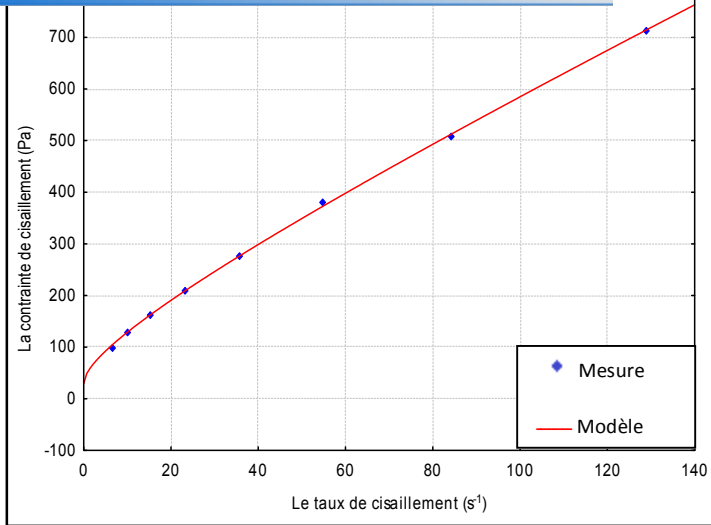


Figure 27 : Courbe d'écoulement de l'essai (9) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

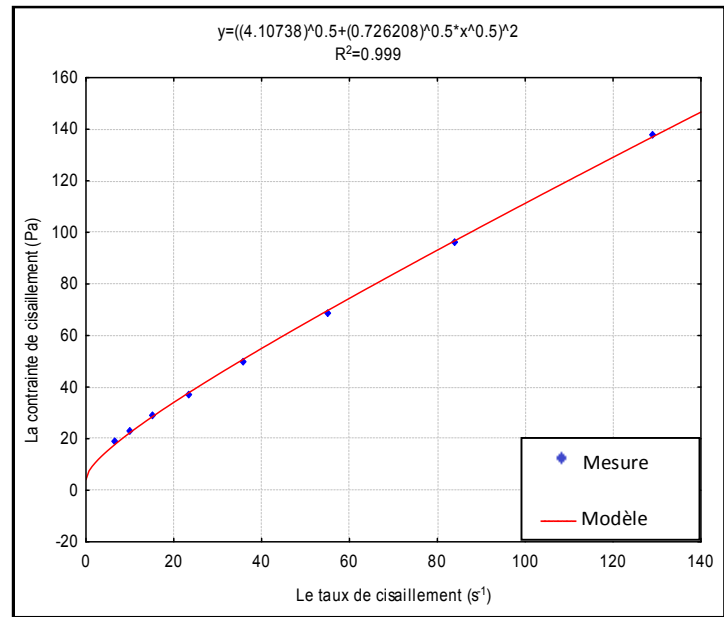


Figure 28 : Courbe d'écoulement de l'essai (10) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

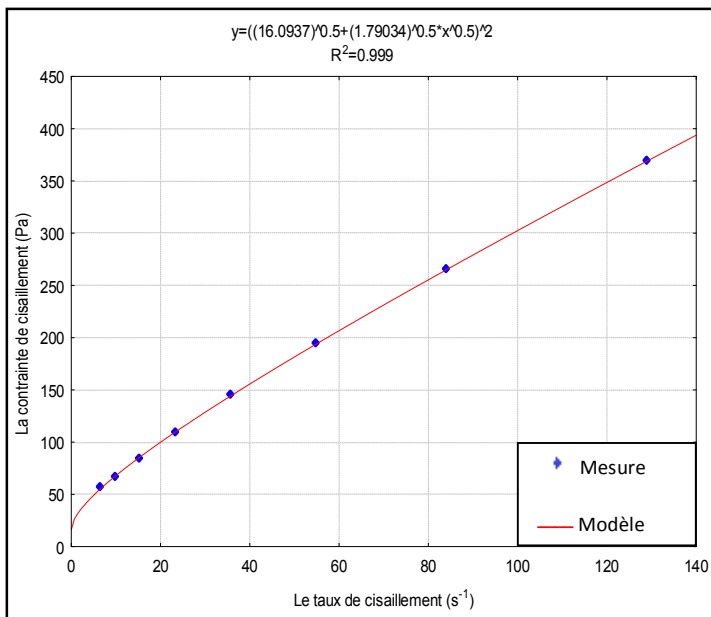


Figure 29 : Courbe d'écoulement de l'essai (11) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

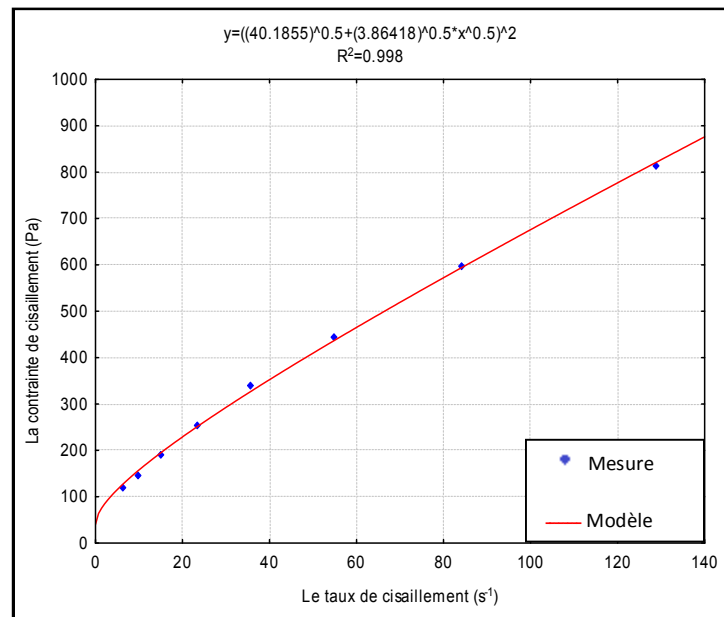


Figure 30 : Courbe d'écoulement de l'essai (12) et courbe d'ajustement du modèle de Casson



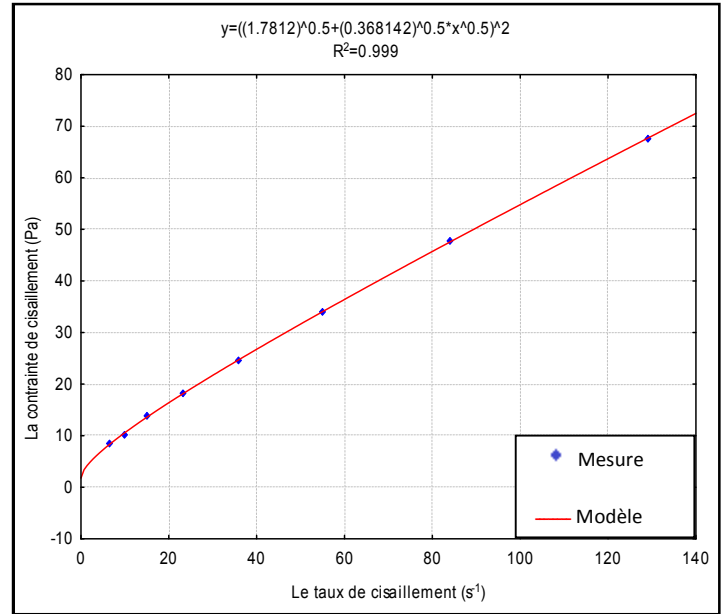
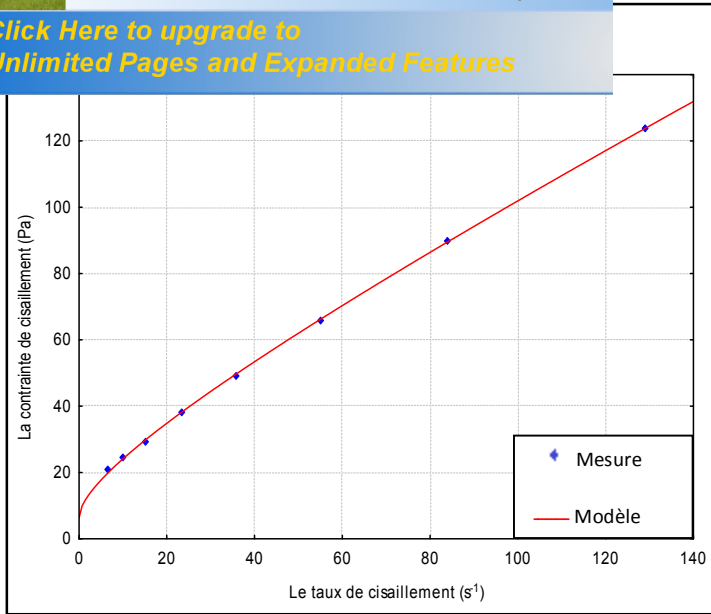


Figure 31: Courbe d'écoulement de l'essai (13) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

Figure 32 : Courbe d'écoulement de l'essai (14) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

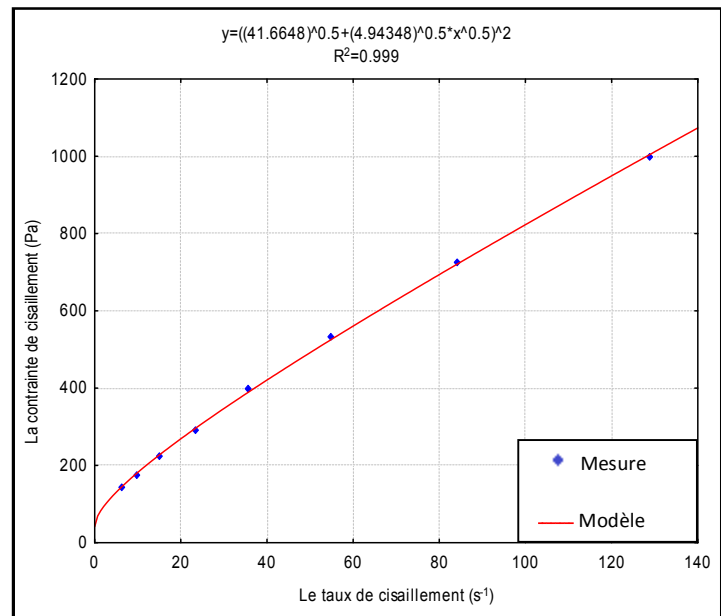
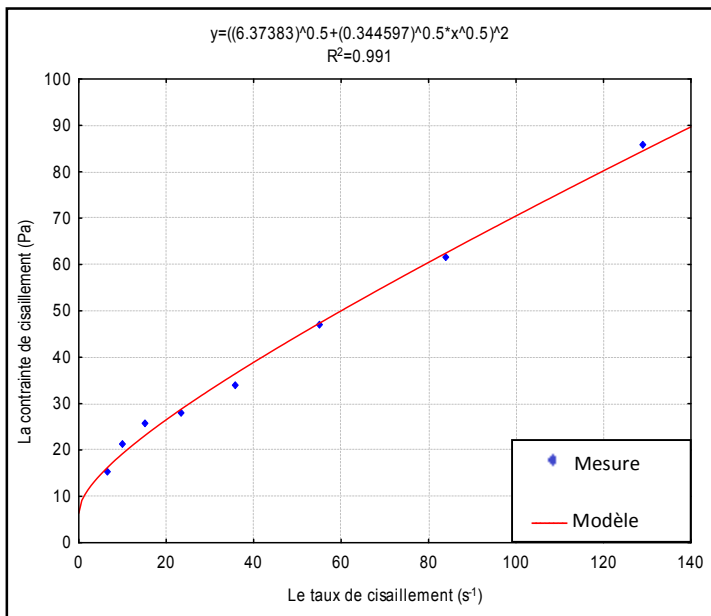


Figure 33 : courbe d'écoulement de l'essai (15) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

Figure 34 : courbe d'écoulement de l'essai (16) et courbe d'ajustement du modèle de Casson

ent les courbes d'écoulement des différents essais  
courbe d'écoulement n'est pas linéaire ce qui confirme  
le comportement non newtonien rhéofluidifiant.

En ce qui concerne le modèle théorique d'ajustement proposé, on remarque que le coefficient de corrélation  $R^2$  est très proche de 1 pour tous les essais, ceci nous conduit à dire que ce modèle est parfaitement adéquat.

Le modèle de Casson est un modèle rhéologique bien connu et il est le plus utilisé pour décrire le comportement rhéologique non newtonien des fluides avec une contrainte seuil. Le modèle a été développé pour des suspensions visqueuses. Certains fluides sont particulièrement bien décrits par ce modèle en raison de leur nature non linéaire pseudoplastique et le chocolat fait partie de ces fluides (**Gonçalves et Lannes, 2010**).

**de chaque essai formulé**

Les paramètres rhéologiques (la contrainte seuil et la viscosité plastique de Casson) ressortis du modèle choisi (modèle de Casson) des différents essais sont représentés par le tableau 10:

**Tableau 10** : Paramètres rhéologiques de chaque essai formulé.

Numéro d'essai	La viscosité plastique de Casson (Pa.s)	La contrainte seuil (Pa)
1	2,17	14,38
2	4,08	39,86
3	0,42	3,23
4	4,27	28,25
5	0,89	9,16
6	3,75	69,1
7	3,63	48,44
8	1,45	10,91
9	3,52	29,32
10	0,72	4,1
11	1,79	16,09
12	3,86	40,18
13	0,57	6,31
14	0,36	1,78
15	0,34	6,37
16	4,94	41,66

Les valeurs des paramètres rhéologiques trouvées varient dans des intervalles compris entre (1,78 – 69,1 Pa) pour la contrainte seuil et entre (0,34 – 4,94 Pa.s) pour la viscosité de Casson. Les valeurs rapportées de la viscosité plastique de Casson pour le chocolat noir sont de 2,1 à 3,9 Pa.s et de la contrainte seuil sont de 4 à 32 Pa (Sokmen et Gunes, 2006). Les résultats obtenus sont proches à ceux publiés dans la littérature.

ce dans les propriétés rhéologique entre les essais  
ns en ingrédients à cause de la différence dans la  
finesse de sucre. Ou nous observons généralement que la viscosité plastique et la  
contrainte seuil augmentent avec l'augmentation des particules plus fines, Clercq  
et al (2012) déclarent que la contrainte seuil augmente lorsque la taille des particules  
diminue car il ya plus de surface pour permettre l'interaction entre les particules.

## II.4 Modélisation des repenses (les paramètres rhéologiques)

### II.4.1. Etablissement des modèles

Après avoir introduit les repenses ou les valeurs des paramètres rhéologiques  
dans le logiciel Disegn Expert 7, nous avons testé le modèle linéaire qui a révélé une  
bonne concordance entre les valeurs observées et calculées à l'intérieur du domaine  
(voir annexe 4), c'est pour cette raison que ce modèle a été retenu. Le logiciel nous  
a permis d'obtenir les coefficients inconnus des modèles pour chacune des  
réponses. Les modèles mathématiques obtenus peuvent s'écrire donc de la manière  
suivante :

$$\text{Viscosité plastique de Casson} = + 0.077032 x_1 - 0.076092 x_2 - 0.74397 x_3$$

$$\text{Contrainte seuil} = + 0.86197 x_1 - 0.82108 x_2 - 19.02271 x_3$$

Ces modèles sont importants, car, c'est à partir d'eux qu'on peut chercher la  
formule du chocolat présentant les propriétés rhéologiques souhaitables, mais il faut  
que les paramètres statistiques de ces modèles soient fiables, pour pouvoir effectuer  
l'extrapolation.

### II.4.2. Evaluation des modèles

La qualité des modèles obtenus est évaluée à travers le coefficient de  
détermination ( $R^2$ ) et le coefficient de détermination ajusté ( $R^2_a$ ), Plus les valeurs des  
coefficients de détermination sont proche de 1, et plus les réponses calculées par le  
modèle sont proches de celles mesurées lors de l'expérimentation. C'est le logiciel  
qui donne directement ces valeurs et qui sont données par le tableau suivant :

**Tableau 11** : Les valeurs de  $R^2$  et  $R^2$  ajusté.

Les valeurs	La contrainte seuil	La viscosité de Casson
$R^2$	0,7701	0,9197
$R^2$ ajusté	0,7347	0,9439

Les valeurs de  $R^2$  signifient que les modèles expliquent bien les résultats, et les  
valeurs de  $R^2$  ajusté confirment que les modèles expliquent bien les résultats et que  
l'ajustement est d'une bonne qualité. Les modèles sont donc bien ajustés, seront  
déclarés globalement significatifs.



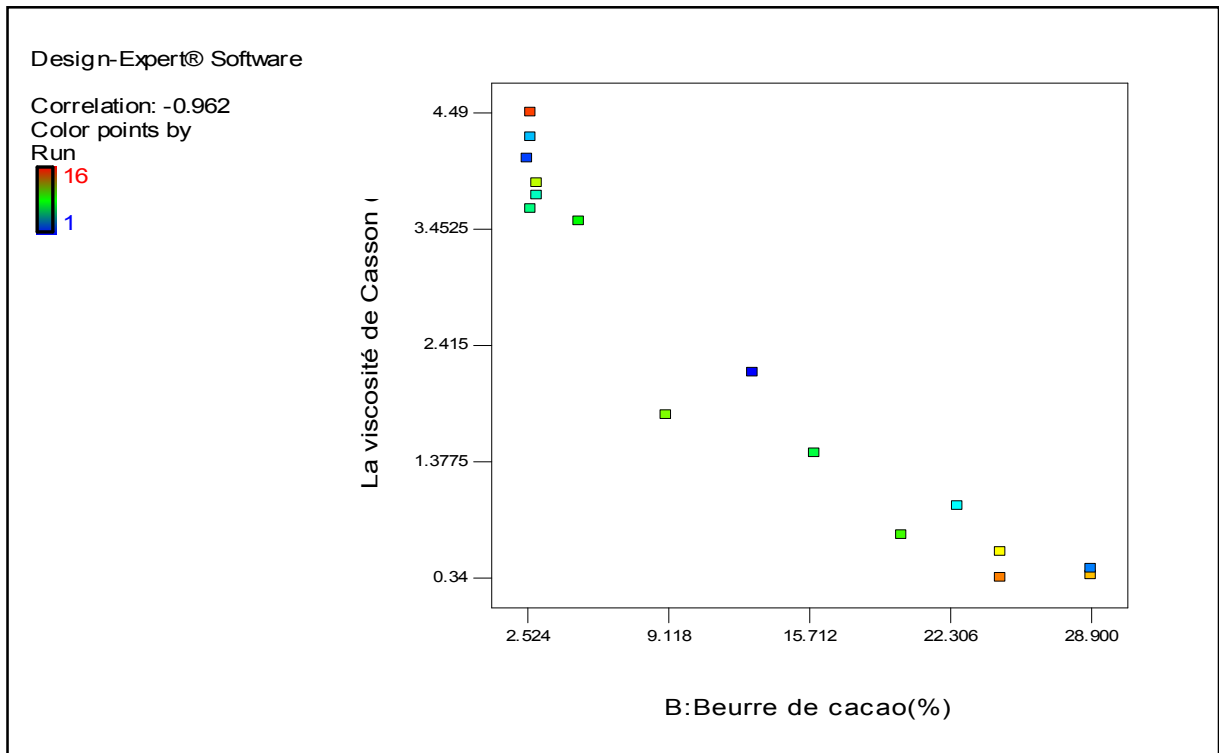


Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

alement que la contrainte seuil et la viscosité de rs et qui sont plus ou mois élevées (entre 28,25 et 69,1) pour la contrainte seuil, et entre 3,63 et 4,49 pour la viscosité plastique), et cela pour les essais présentant un pourcentage massique en masse de cacao de (~ 56%). Ces essais sont caractérisés par des teneurs en beurre de cacao proches (~ 2), donc la viscosité de Casson et la contrainte seuil varient à ce stade par la variation de la teneur en lécithine.

**II.4.3.2. Variation des réponses en fonction de pourcentage massique du beurre de cacao**

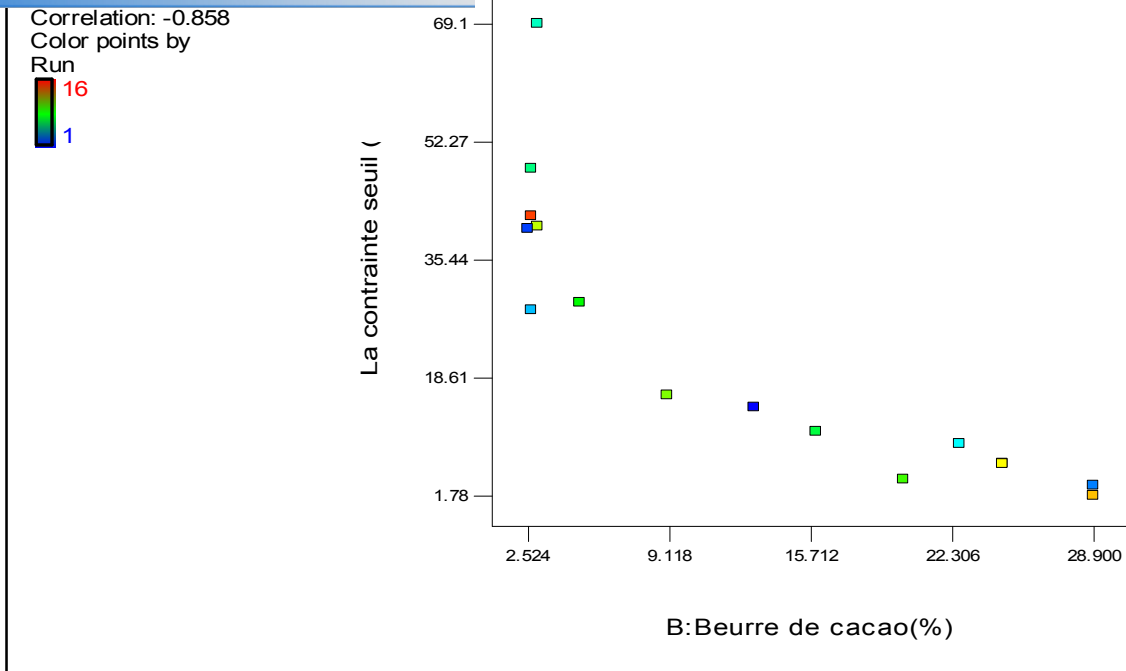
Les figures (37) et (38) présentent respectivement la variation de la viscosité de Casson et de la contrainte seuil en fonction de pourcentage massique du beurre de cacao :



**Figure 37** : Variation de la viscosité plastique de Casson en fonction de pourcentage massique du beurre de cacao.



Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features



**Figure 38** : Variation de la contrainte seuil en fonction de pourcentage massique du beurre de cacao.

D'après les figures, nous pouvons voir que la viscosité et la contrainte seuil sont élevées pour les essais ayant une teneur faible en beurre de cacao (~ 2,52%), ces essais qui ont présenté une teneur en masse de cacao de (~ 56%) (La variation entre ces résultats obtenus dépend normalement de la concentration de la lécithine).

Nous observons par la suite une diminution de la viscosité de Casson et de la contrainte seuil avec l'augmentation de pourcentage massique du beurre de cacao. Sokmen et Gunes (2006), ont observé la diminution de la contrainte seuil de 0,617 Pa jusqu'à 0,01 Pa et de la viscosité de Casson de 0,617 Pa.s jusqu'à 0,001 Pa.s en augmentant le pourcentage de beurre de cacao de 0 à 20%.

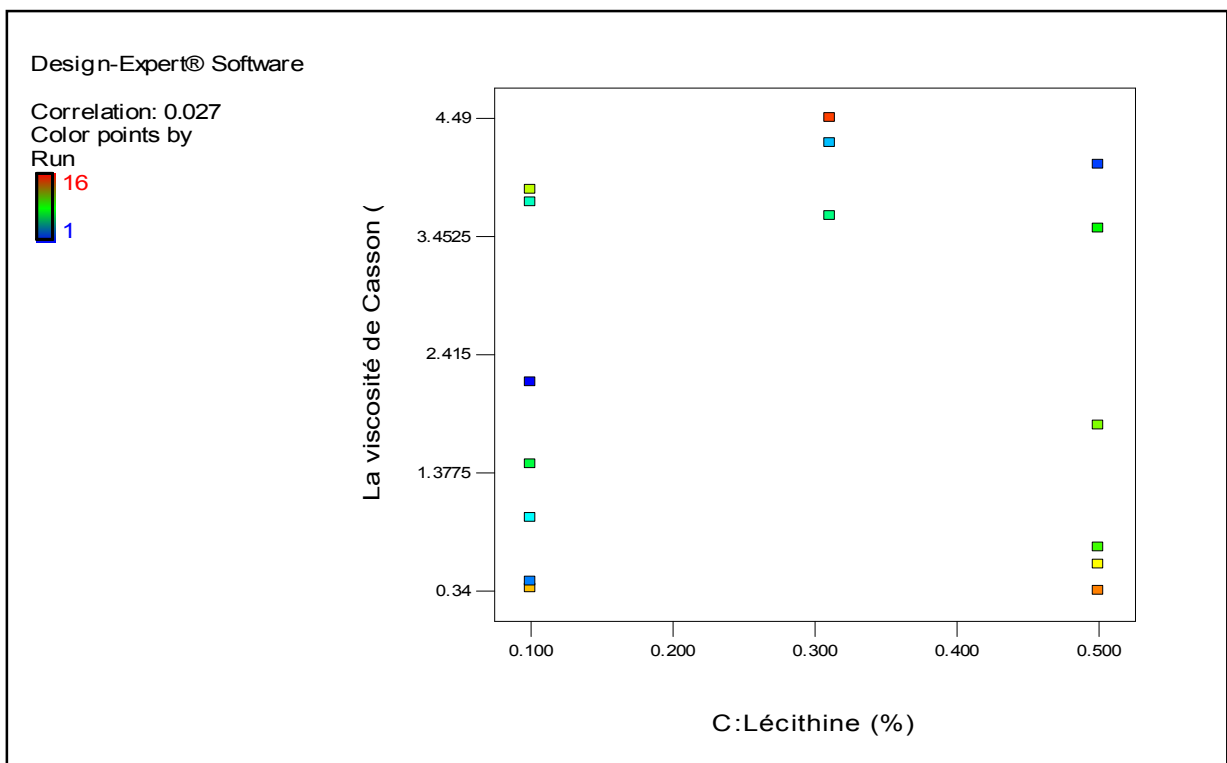
La diminution de la viscosité est due à l'augmentation de la matière grasse libre, selon Beckett (2009), Dans le chocolat fondu, la matière grasse peut être présentée de deux manières: soit sous forme de graisse libre ou sous forme de graisse liée par et à l'intérieur des particules solides. C'est la matière grasse libre qui permet aux particules solides de passer devant les autres et permet donc au chocolat de s'écouler. Donc, cette matière grasse libre a un effet important sur la lubrification de l'écoulement quand il a lieu, donc la viscosité plastique diminue considérablement (Beckett, 2000).

tt (2000) déclare que la valeur de la contrainte seuil est liée à la distance absolue entre elles. La matière grasse libre augmente la distance entre les particules ce qui diminue les interactions entre elles diminuant par conséquent la contrainte seuil.

Nous remarquons une diminution de la viscosité plastique de Casson à un pourcentage de beurre de 9,11 % et de 20,04 %, puis une augmentation de cette viscosité malgré l'augmentation de la teneur en beurre, cela est expliqué par l'augmentation de la teneur en lécithine aux teneurs en beurre de cacao citées. Selon Beckett (2009), L'ajout de 0,3% de lécithine de soja permet de réduire la viscosité de la suspension autant que si on ajoutait dix fois l'équivalent en masse de beurre de cacao.

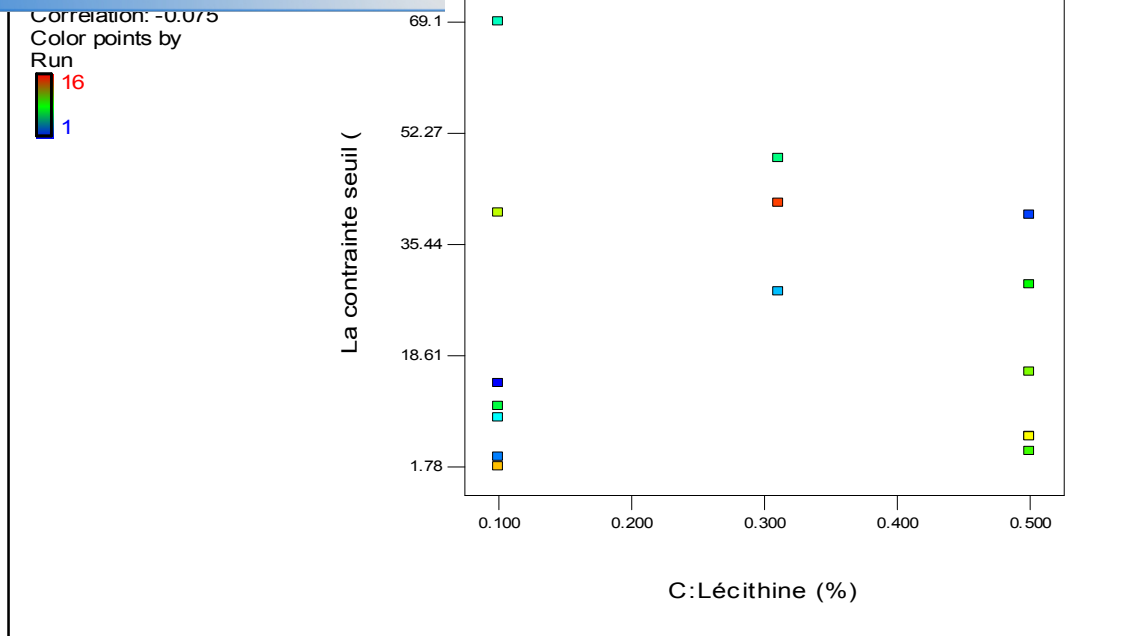
### II.4.3.3. Variation des réponses en fonction de pourcentage massique de la lécithine

La variation de la viscosité de Casson et de la contrainte seuil en fonction de la teneur en lécithine est représentée respectivement par la figure (39) et la figure (40) :



**Figure 39** : Variation de la viscosité plastique de Casson en fonction de pourcentage massique de la lécithine.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features



**Figure 40** : Variation de la contrainte seuil en fonction de pourcentage massique de la lécithine.

L'effet de la lécithine n'est pas assez clair, l'étude de l'effet de la lécithine sur les propriétés rhéologiques sera effectuée sur les remarques observées précédemment lors de la variation de la teneur en lécithine, et sur la comparaison entre les essais ayant les mêmes proportions ou des proportions approchantes en ingrédients et qui se diffèrent dans la teneur en lécithine, Il s'agit des essais (2, 4, 6, 7, 12 et 16), qui possèdent une viscosité plastique varie dans un intervalle de 3,63 à 4,49 Pa.s (figure 39), et une contrainte seuil varie dans un intervalle de 28,25 à 69,1 Pa (figure 40).

Nous avons remarqué précédemment la diminution de la viscosité lorsque la teneur en lécithine augmente. L'effet sur la contrainte seuil était différent ou nous avons remarqué une augmentation de la contrainte seuil à (0,5 %) de lécithine d'un coté et une diminution de la même propriété à la même quantité de lécithine d'un autre coté. La variation dans la finesse entre les essais peut largement expliquer cette différence et spécialement parce que la contrainte seuil est influencée surtout par les interactions entre les particules.

Pour plusieurs auteurs, l'augmentation de la teneur en lécithine provoque la diminution de la contrainte seuil jusqu'à une teneur critique au-dessus de laquelle augmente de nouveau, par contre la viscosité continue à diminuer. Beckett (2009), a déclaré que lors de l'addition de lécithine au chocolat, la valeur de la contrainte seuil sera d'abord diminuée jusqu'à une concentration de lécithine critique au-dessus de

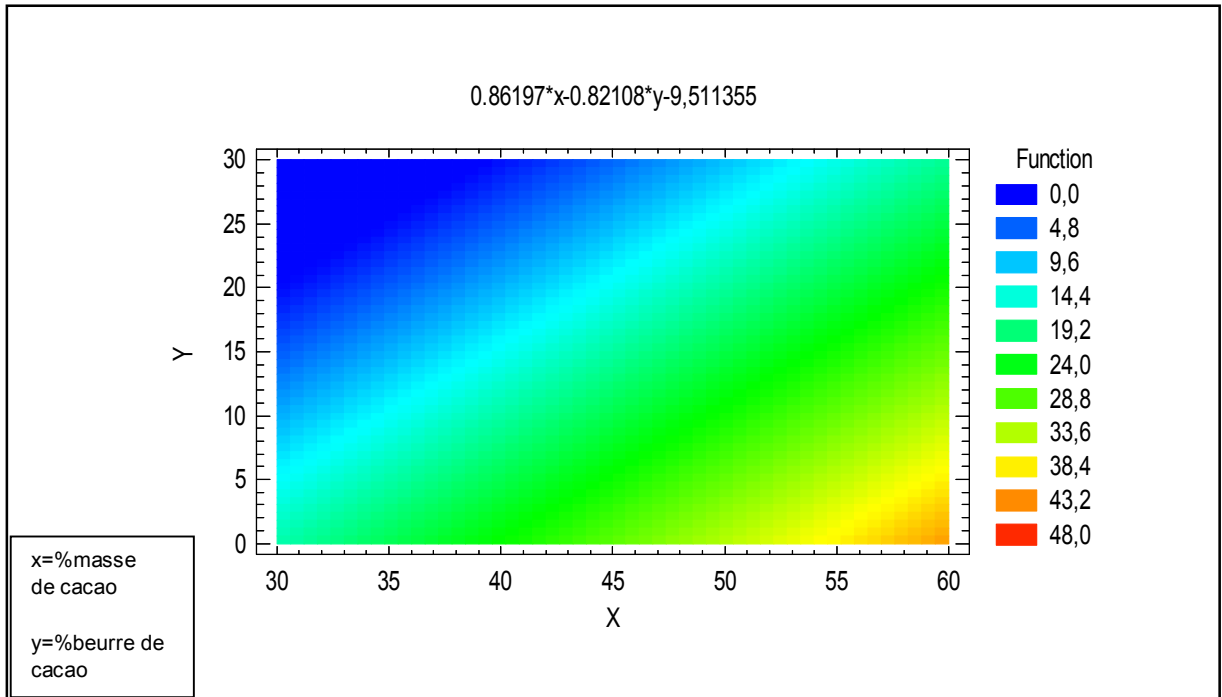
te seuil sera de nouveau augmentée. Graef et al et effet de la lécithine, en ajoutant 0,2% de lécithine a provoqué une forte réduction de la contrainte seuil d'environ 8,3 à environ 2,3 Pa, tandis que 0,4% et les concentrations élevées de lécithine ont donné lieu à une augmentation de la contrainte seuil de nouveau. En revanche, la viscosité a continué à diminuer en ajoutant plus de lécithine. (Afoakwa et al, 2007) a expliqué que l'augmentation de la valeur de la contrainte seuil à une teneur élevée en lécithine est lié à la formation des micelles dans la phase continue peut-être des multicouches autour du sucre, ce qui entrave l'écoulement. Sinon, des micelles peuvent se former dans la phase continue et interagir avec les particules de sucre entièrement couvertes, ce qui augmente par conséquent la valeur de la contrainte seuil.

La réduction de la viscosité plastique avec l'augmentation de la teneur en lécithine est attribuée à l'association de la lécithine avec les particules de sucre. La lécithine migre vers les interfaces de sucre / gras et couvrent les cristaux de sucre, influençant la rhéologie et aidant la dispersion des cristaux de sucre dans la phase continue (Afoakwa et al, 2007). Chevalley (1999) a suggéré que la lécithine forme une monocouche sur la surface des particules de sucre permettant une plus grande mobilité dans les suspensions, tout en augmentant l'étalement de la matière grasse.

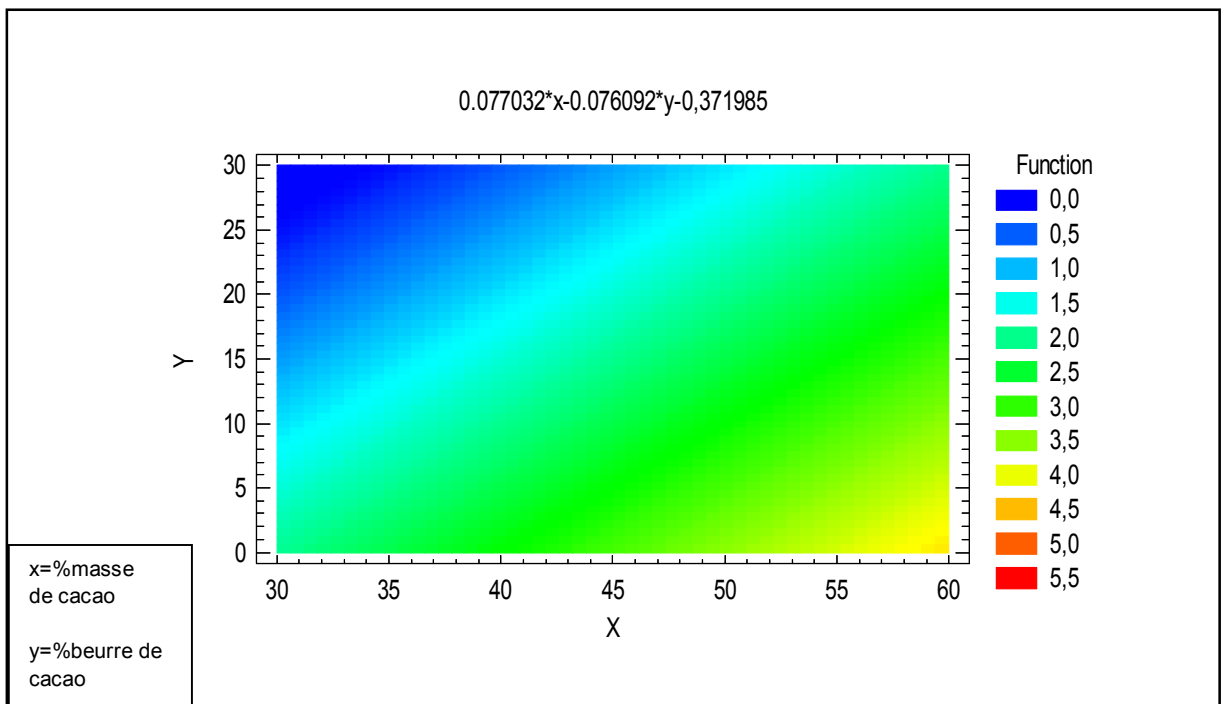
En comparant entre les essais cités ci-dessus, nous remarquons que la viscosité varie légèrement entre eux, cela à cause de la quantité élevée en masse de cacao par rapport à la quantité de beurre pour ces essais, l'effet de réduction sur la viscosité est plus important sur les chocolats les plus maigres car l'action de la lécithine est faible sur la masse de cacao et plus efficace sur les mélanges beurre de cacao/sucre, grâce à l'action des particules de sucre (Pépin, 2002). Et pour la contrainte seuil on observe généralement une diminution de la contrainte seuil avec l'augmentation de la teneur en lécithine.

e de la lécithine à 0,5%, nous pouvons tracer une quations de modélisation des deux réponses (figure

41) (figure 42).



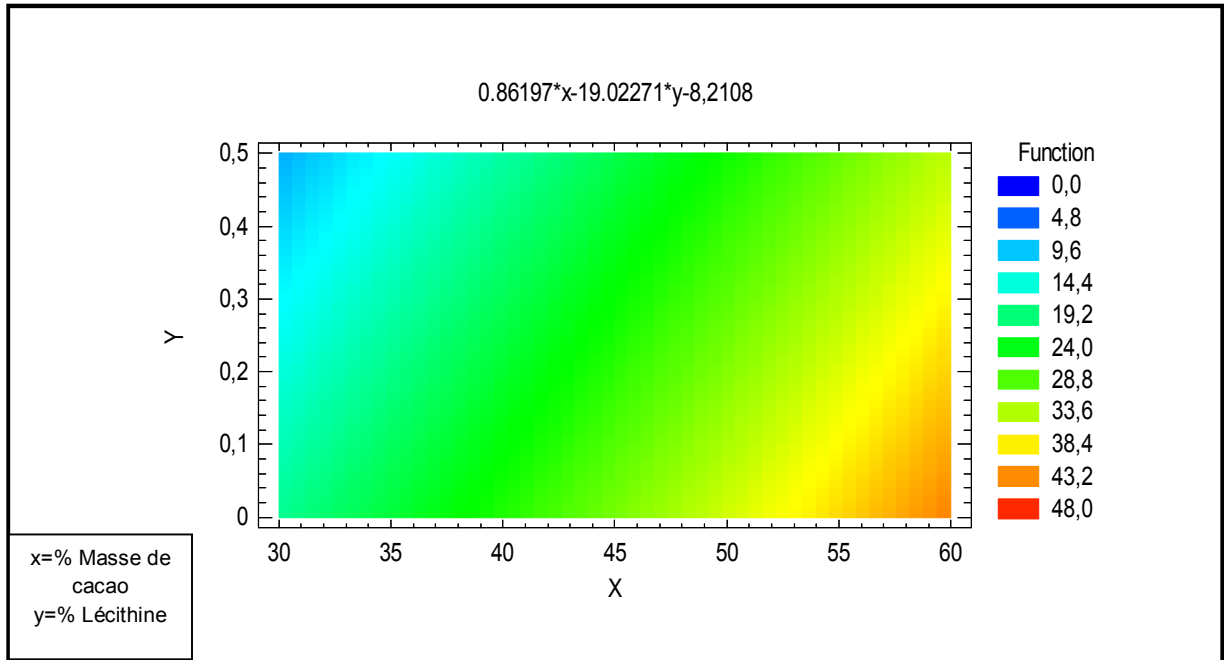
**Figure 41 :** Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la contrainte seuil à un taux de lécithine fixé à 0,5%.



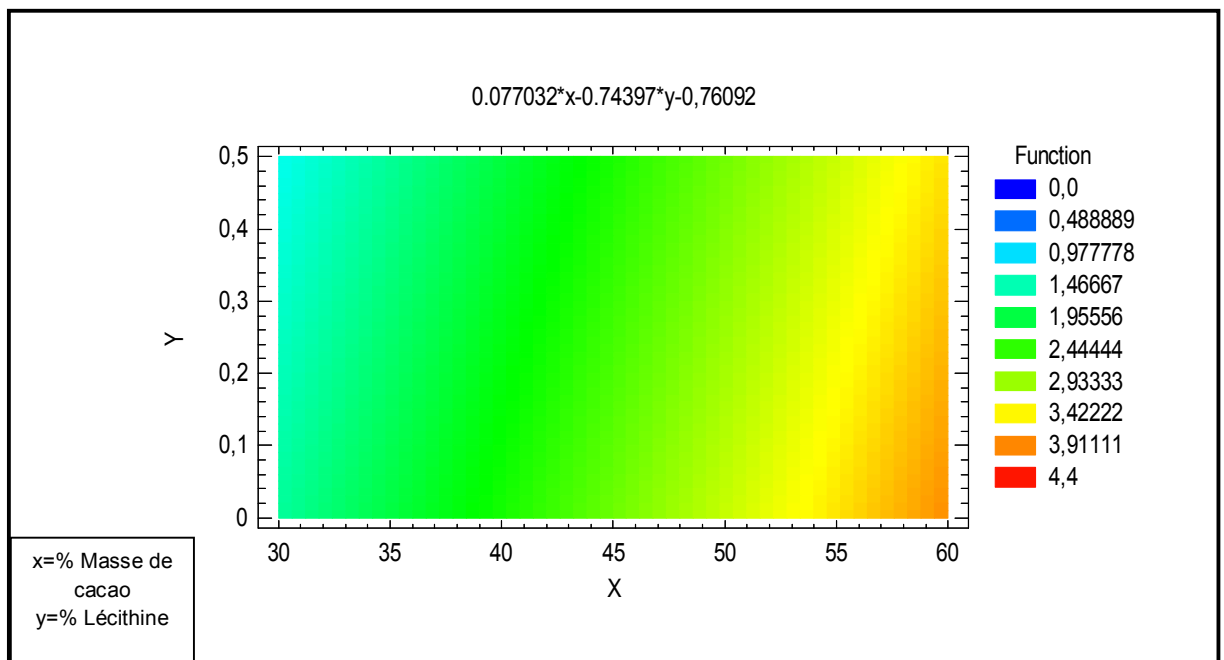
**Figure 42:** Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la viscosité de Casson à un taux de lécithine fixé à 0,5%.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

On ne peut pas voir l'effet de la lécithine au niveau des deux réponses en fonction de pourcentage de la lécithine, mais cet effet devient bien claire en traçant une surface de réponse à partir des équations de modélisation tous en fixant le taux de beurre de cacao à 10% (figure 43), (figure 44).



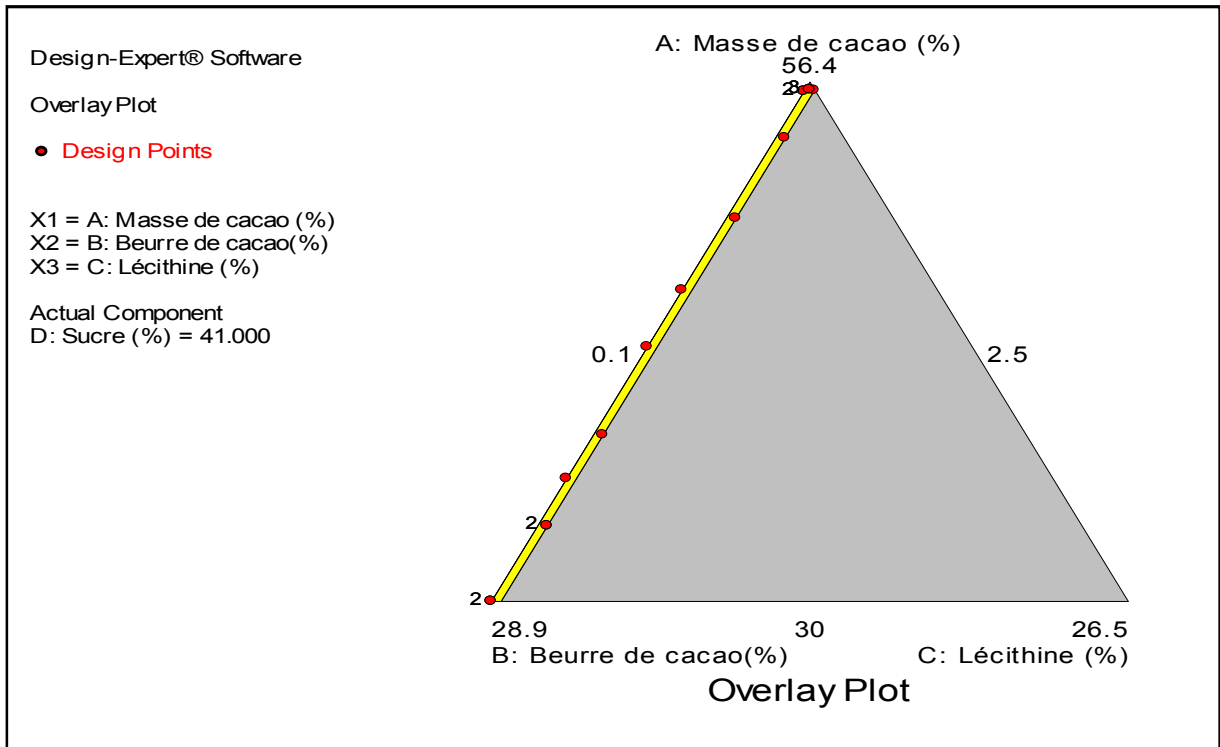
**Figure 43:** Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la contrainte seuil à un taux de beurre de cacao fixé à 10%.



**Figure 44:** Surface de réponse tracée à partir de l'équation de modélisation de la viscosité de Casson à un taux de beurre de cacao fixé à 10%.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

Dans cette partie nous allons procéder à une optimisation des propriétés rhéologiques d'une formule de chocolat noir en utilisant toujours le logiciel Design Expert 7. Cette optimisation est basée sur la création d'une zone ou « fenêtre » souhaitable des repenses au niveau de domaine expérimental illustré dans la figure (45) :

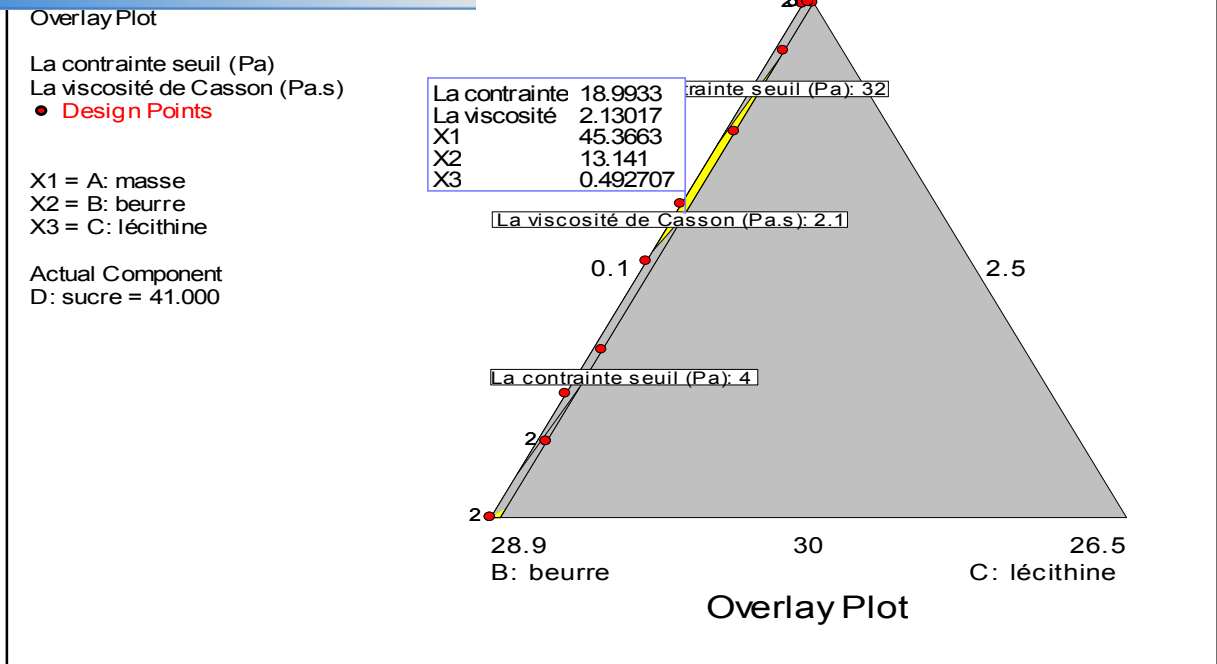


**Figure 45** : Domaine expérimental ainsi que la position des points des mélanges

Nous nous rappelons des valeurs rapportées de la viscosité plastique de Casson et de la contrainte seuil pour un chocolat noir qui se situent respectivement dans des fourchettes de : 2,1 à 3,9 Pa.s pour la viscosité plastique et de 4 à 32 Pa pour la contrainte seuil (Sokmen et Gunes, 2006). Après l'insertion de ces deux intervalles au niveau du logiciel, le logiciel nous donne plusieurs formules (voir annexe 5) et qui font partie de la couleur jaune « fenêtre » montrée sur la figure (46). Les secteurs ombragés sur le domaine expérimental ne répondent pas aux critères de la sélection.



Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features



**Figure 46** : la formule sélectionnée et ses critères.

La figure (46) montre également la formule sélectionnée par le logiciel avec ses critères, cette formule répond aux exigences économiques requises par les industriels, où on cherche une formule avec moins de beurre de cacao à cause de son coût élevé, c'est la quantité de la lécithine qui permet de diminuer la viscosité plastique et la contrainte seuil.

La formule choisie est donc : 45,36% de masse de cacao, 13,14% de beurre de cacao et 0,49% de lécithine de soja, présente une viscosité de casson de 2,13 Pa.s ; une contrainte seuil de 18,99 Pa



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion

À la suite de ce travail une étude de l'influence de la composition du chocolat noir sur ses propriétés rhéologiques a été réalisée, ainsi que la modélisation et l'optimisation de ces propriétés par l'utilisation de la méthode des plans d'expériences.

Nous avons étudié le comportement rhéologique du chocolat, nous avons trouvé que tous les essais présentent un comportement rhéofluidifiant, ce qui nous conduit à dire que la composition n'influence pas le comportement rhéologique du chocolat, par contre la viscosité apparente a montré une variation entre les essais, où le beurre de cacao diminue cette viscosité tandis que la masse de cacao l'augmente.

Pour le modèle de Casson utilisé pour ajuster les courbes d'écoulement, a montré une bonne corrélation, il nous a permis de ressortir deux paramètres rhéologiques, qui sont : La contrainte seuil et la viscosité plastique, qui ont montré une grande dépendance à la finesse des particules du sucre, où les chocolats finement broyés présentent une contrainte seuil et une viscosité plastique élevées à cause de l'augmentation de la surface de friction entre les particules.

Au cours de l'étude de l'influence de la composition : la fraction de la masse de cacao, du beurre de cacao et de la lécithine de soja sur la contrainte seuil et la viscosité plastique de Casson, nous avons observé que ces paramètres augmentent avec l'augmentation de la masse de cacao à cause de l'augmentation de la fraction solide ce qui augmente les interactions entre les particules, et diminuent avec l'augmentation du beurre de cacao dans la formule en augmentant la distance entre les particules diminuant par conséquent la surface de friction entre elles.

En ce qui concerne l'effet de la lécithine de soja, son augmentation provoque une diminution de la viscosité plastique, ce qui permet de diminuer la quantité de beurre de cacao utilisée, cependant son effet n'est pas important lorsque la teneur en masse de cacao est très élevée. La lécithine provoque également une diminution de la contrainte seuil, cependant, une quantité élevée en lécithine de 0,5 % peut avoir un effet inverse sur la contrainte seuil à cause de la formation des micelles dans la suspension, mais la finesse peut avoir un effet déterminant sur cette propriété.

Dans cette étude nous avons modélisé les propriétés rhéologiques de notre chocolat noir pour finir avec une optimisation qui nous a permis de donner une formule optimale avec les propriétés rhéologiques désirables, elle s'écrit comme suit : 45,36% de masse de cacao, 13,14% de beurre de cacao et 0,49% de lécithine de soja, et présente une viscosité de Casson de 2,13 Pa.s et une contrainte seuil de 18,99 Pa.



Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# REFERENCES

# BIBLIOGRAPHIQUES

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## ences bibliographiques

- 1- **Afoakwa E.O., Paterson A., Fowler M., 2007.** Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate – a review. Trends in Food Science & Technology. United Kingdom.
- 2- **Afoakwa E.O., 2010.** Chocolate Science and Technology. Edition Wiley Blackwell. UK
- 3- **AFNOR , 2007.** La norme NF EN ISO 734-1. Tourteaux de graines oléagineuses - Détermination de la teneur en huile : méthode par extraction à l'hexane (ou à l'éther de pétrole).
- 4- **Anonyme, 1999.** www. Elyssa. Oliveoil. Com/Fr /
- 5- **Anonyme, 2006.** Le chocolat. UNIFA. Bruxelles. P 11,13,14, 15
- 6- **Anonyme , 2008.** histoire du chocolat.
- 7- **Anonyme 2, 2010.** Cacao & Chocolade online. (En ligne : <http://www.cacaochocolade.nl/main.php> )
- 8- **Anonyme, 2012.** Les vertus du chocolat.
- 9- **Apfelbaum M., Romon M., DudusM., 2004.** Diététique et nutrition. Editions Masson. 6<sup>ème</sup> édition. Paris. P 516
- 10- **Asiedu J. J., 1991** .La transformation des produits agricoles en zone tropicale: approche technologique. KARTHALA Editions. Pays bas. P 40, 41,44
- 11- **Badoer V., 2011.** La chocolatrie.
- 12- **Bardoulat M., 2005.** Le chocolat, du plaisir à la santé. Editions Alpen. France P 23
- 13- **Barel M., 1998** in pontillon J. Cacao et chocolat : production, utilisation, caractéristique. Editions technique & documentation. Paris. P 109, 113
- 14- **Barel M., 2009.** Du cacao au chocolat, l'épopée d'une gourmandise. Editions Quae. France .P 59, 97, 100
- 15- **Barel M., 2010** Le chocolat est-il bon pour la santé .P 124
- 16- **Beckett, S.T., 2000.** The science of chocolate. Editions Royal Society of Chemistry Paperbacks. UK
- 17- **Beckett, S. T. 2009.** Industrial chocolate manufacture and use. Wiley-Blackwell edition. United Kingdom

28, 36

rimentale et modélisation de l'écoulement et de la  
sité Libre de Bruxelles. Belgique. P 23, 25, 26, 27,

**19- Benazouz-Ahmed K., 2010.** Relations entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersions de particules d'argile dans des solutions de polymères. Université de Haute alsace.France. P 8, 10

**20- Bouzas J., & Brown B. D., 1995.** Interactions affecting microstructure, texture, and rheology of chocolate confectionery products. New York.

**21- Brochoire G., 1998.** Les Nouvelles de la boulangerie pâtisserie. Éd : S.O.T.A.L. P 13 ,14, 15,16

**22- Bryselbout P.H., Fabby Y., 2007.** Guide technologique de la confiserie industrielle. Editions Presses Sorbonne Nouvelle. Paris.

**23- Caubet S, 2010.** Production basse énergie pour la production d'émulsions très concentrées huile dans eau : caractérisation, intensification et application. Université de pau et des pays de l'adour. France. P 15, 16, 17

**24- Chevalley J.1999.**Chocolate flow properties. Editions Springer.

**25- Chkir M., 2011.** Synthèse de gels phosphocalciques issus de déchets industriels carbonatés Caractérisation physico-chimique, thermique et rhéologique. Université de toulouse. France. P 50

**26-Clercqa, N.D., Moensa K., Depyperea F., Ayalab J.V., Calliauwb G., Greytb W.D., Dewettincka K., 2012.** Influence of cocoa butter refining on the quality of milk chocolate. Journal of Food Engineering. Belgium

**27- Coquitart C., 2003.** Le chocolat. P 7 ,8.

**28- Couarraze G., Grossiord J.L., 1991.** Initiation à la rhéologie. Editions technique & documentation. 2<sup>ème</sup> édition. Paris.

**29- Couarraze G., Grossiord J.L., 2000.** Initiation à la rhéologie. Editions technique & documentation. 3<sup>ème</sup> édition. Paris. P 4, 9

**30- Cros E., 1998** in pontillon. Cacao et chocolat : production,utilisation, caractéristique. Editions technique & documentation. Paris.

**31- Daverio S.,2005.** Le chocolat dans tous ses états. Université Henri Poincare. Nancy.

**32- De Ginestel G., 1998** in pontillon. Cacao et chocolat : production,utilisation, caractéristique. Editions technique & documentation. Paris. P 210,402, 409

Thiers. P., 1999. Les mondes du cacao. Editions

- 34- Do T. A. L., Vieira J., Hargreaves M., Mitchell J.R., Wolf B., 2010.** Structural characteristics of cocoa particles and their effect on the viscosity of reduced fat chocolate. Food science and technology. United Kingdom.
- 35- Dodémont J., 2007.** Chimie et la chocolaterie. P 68,69
- 36- Driesbeke J-J., Saporta G., Fine J., 1997.** Plans d'expériences: applications à l'entreprise Editions TECHNIP.France. P 282
- 37- Espinosa-Brisset L. C., 2012.** Texture de la purée de pomme : influence de la structure sur les propriétés rhéologiques et la perception sensorielle - effet du traitement mécanique. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement. France. P 44, 45, 46
- 38- FAO, 1990.** Utilisation des aliments tropicaux: graines oléagineuses tropicales. Edition FAO. P 75, 76. Rome
- 39- FCC : Fédération de commerce de cacao, 2002.** série économie. Vol 99. n°5, 20
- 40- Fernandes V.A., Müller A.J, Aleida J. Sandoval A.J., 2012.** Thermal, structural and rheological characteristics of dark chocolate with different compositions. Journal of Food Engineering. Venezuela.
- 41- Fry F., 2007.** Chocolat en tablette. Editions le point. Paris.
- 42- Graef V.D., Depypere F., Minnaert M., Dewettinck K., 2011.** Chocolate yield stress as measured by oscillatory rheology. Food Research International. Belgium.
- 43- Graille J., 2003.** Lipides et corps gras alimentaires. Collection Sciences et Techniques Agroalimentaires, Editions Tec & Doc.
- 44- Gamsriegler A., 2002.** Le chocolat. P 15, 16, 20, 23, 31, 22
- 45- Gonçalves S.V., Lannes S.C., 2010.** Chocolate rheology. Ciência e Tecnologia de Alimentos. Brasil.
- 46- Guazzelli E., 2011.** Rhéologie des fluides complexes. P 3
- 47- Guichard E., Genot C., Voilley A., 2012.** Texture et flaveur des aliments: Vers une conception maîtrisée. Editions Educagri. Paris. P 88
- 48- Guillemain J.P., 2008.** Rhéologie de suspensions concentrées de matériaux énergétiques recyclables – Modélisation du temps de coulée. Ecole Nationale supérieure des mines. France.



**50-ISO : International Organization for Standardisation, 2002. La méthode . ISO 6321 : 2002. Corps gras d'origines animaux et végétales : Détermination du point de fusion en tube capillaire ouvert.**

**51- Khodorowsky K.,Hervé. R, 2008. L'ABC daire du chocolat. Editions Flammmation. Paris**

**52- Lock J.F., 1960. Mécaniques des fluides. Editions Eyroles.**

**53- Martens H., 2011. Le cacao : un levier de développement. Ed CTB. Belgique. P 9, 22, 36**

**54- Minifie B. W., 1989. Chocolate, Cocoa and Confectionery: Science and Technology. Editions Springer. 3<sup>rd</sup> edition, United states.P 85**

**55- Multon J-L., Martin G., 1980. Conservation et stockage des grains et graines. Edition technique et documentation. Lavoisier.**

**56- Pépin V.,2002 .Cacaos et chocolats : traitement et fabrication. Éditions Techniques de l'Ingénieur. Paris. P 4, 11, 12, 13, 14**

**57- Philips G.O., Williams P.S., 1990. Colle et stabilisation pour l'industrie alimentaire. Edition Pression D'Université D'Oxford.**

**58- Poncet S., 2012.Initiation à la rhéologie.**

**59- Pontillon J., 1998. Cacao et chocolat : production, utilisation, caractéristique. Editions technique & documentation. Paris. P 311, 313, 314, 417, 431**

**60- Prior E., 2003. Usage des corps gras alimentaires dans les différents secteurs de la technologie alimentaire. In : Lipides et corps gras alimentaires. Edition : Technique et documentation. Lavoisier. Paris**

**61- Rebiha M., 2004.Etude rhéologique et physique des émulsions à base de caseinate de sodium. Université de Blida. P 29, 30, 31**

**62- Sahin S., Sumnu S.G., 2006. Physical Properties of food. Editions Springer Science+Business Media, United States of America. P 44, 45, 48**

**63- Schantz B., Rohm H., 2003. Influence of lecithin-PGPR blends on the rheological properties of chocolate. Lebensm.-Wiss. u.-Technol. Germany**

**64- Scher J., .Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires. Éditions Techniques de l'Ingénieur. France. P 2, 3, 4, 5, 7,8, 10, 11**

**Roberts, I. (2002).** The influence of particle size  
. Journal of Food Engineering,

**66- Sokmen A., Gunes G.,2006.** Influence of some bulk sweeteners on rheological properties of chocolate. Food Science and Technology. turkey

**67- Steffe J.F., 1996.** Rheological methods in food engineering freeman press, 2<sup>nd</sup> Edition.

**68- Stéphane K., Koffi A., 2009.** Additifs alimentaires café-cacao. Institut national Félix Houphouët Boigny de Yamoussoukro. Côte d'Ivoire

**69-Thomassey M.,2010.** Le processus de fabrication du chocolat.

**70- van der Vaart K., Depypere F., Graef V.D., Schall P., Fall A., Bonn D., Dewettinck K., 2013.** Dark chocolate's compositional effects revealed by oscillatory rheology. Eur Food Res Technol. Berlin

**71- Viola P., 1970.** Les graisses dans l'alimentation humaine. Edition C .O.I. Madrid

**72- WCF : World Cocoa Foundation. 2010.**Cocoa market update . p1-2

**73- Wiley L. , 2007.** Kirk-othmer food and feed technologie. Editions Wiley. New york. p 238, 239

**74- Wybauw J.P., 2005.** Petits chocolats Grande expérience. Editions Lannoo sa, tielt. Belgique . P 18, 26



*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **ANNEXES**

**Annexe 1**

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)

**Tableau 1.** Les valeurs de la viscosité mesurées de tous essais en (Pa.s) pour chaque taux de cisaillement

$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E11	E14	E15	E16
6,46	6,17	12,3	1,51	13,60	3,63	21,7	17	4,52	12,7	2,41	7,24	15	7,24	1,13	2,73	18
9,9	5,43	10,2	1,19	11,3	2,94	16,4	13,5	3,85	10,4	1,9	5,56	12,2	5,56	0,887	1,64	14,5
15,2	4,7	8,68	0,989	9,57	2,47	13	11	3,35	8,54	1,54	4,62	10,4	4,62	0,734	1,27	12,1
23,3	4,17	7,63	0,844	8,29	2,14	10,7	9,16	2,99	7,27	1,31	3,86	8,95	3,86	0,637	0,926	10,4
35,7	3,74	6,79	0,737	7,24	1,88	9,08	7,87	2,61	6,36	1,14	3,32	7,74	3,32	0,561	0,77	9,08
54,9	3,33	6,22	0,654	6,52	1,67	7,82	6,86	2,29	5,59	1,02	2,91	6,67	2,91	0,505	0,684	8,03
84,1	3,01	5,73	0,59	5,85	1,49	6,68	5,97	2,05	5	0,932	2,58	5,82	2,58	0,464	0,607	7,1
129	2,66	5,41	0,535	5,31	1,28	5,67	5,23	1,82	4,48	0,872	2,34	5,17	2,34	0,428	0,545	6

**Tableau 2 :** Les valeurs de la contrainte de cisaillement mesurées de tous les essais en (Pa) pour chaque taux de cisaillement

$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
6,46	48,7	125	12,5	106	29,1	172	135	35,2	99,8	18,9	56,4	121	20,7	8,61	15,3	142
9,9	64,7	151	14,5	137	35,6	196	164	44,8	127	22,9	67,1	147	24,5	10	21,1	176
15,2	90,8	192	17,9	176	45,4	237	199	63,8	163	29,1	84,1	191	29,2	13,8	25,8	226
23,3	118	253	24,5	234	61,1	305	262	84,4	210	37,3	109	253	37,9	18,2	28	293
35,7	165	344	32,3	311	81,1	396	343	115	277	49,8	145	338	49,2	24,6	33,8	397
54,9	222	471	44	430	111	558	455	154	379	68,5	194	446	65,9	34	46,9	532
84,1	307	637	60,4	606	152	685	604	209	509	96,3	265	598	89,7	47,7	61,5	725
129	413	837	84	818	200	900	811	284	714	138	369	813	124	67,6	85,8	999

$\dot{\gamma}$  : Le taux de cisaillement (s<sup>-1</sup>)

**Annexe 2**

**Tableau 3 . Quantité en kilogramme de chaque composant pour tous les essais**

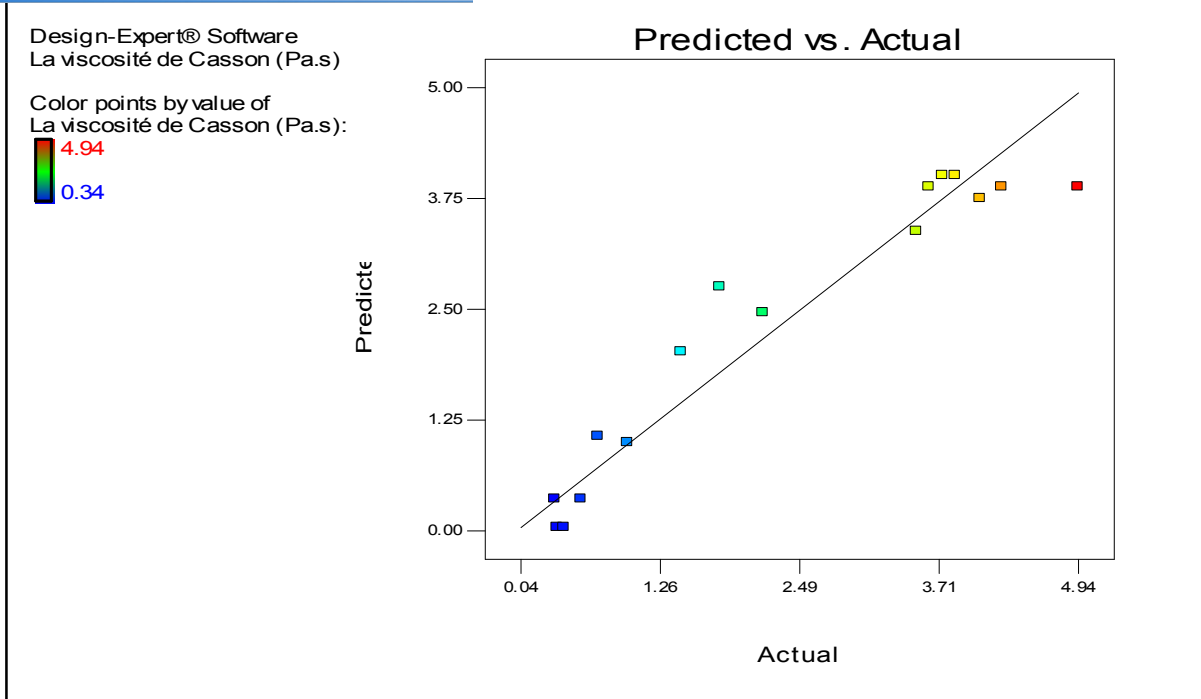
Les essais	Q de la pâte	Q de masse	Q beurre rajouté au pétrin	Q pate au pétrin	Q de beurre rajouté au couche	Q Lécithine
E1	561	246	13	505	60	0.56
E2	537	300	9	529	4.55	2.68
E3	537	161	29	410	125.32	0.53
E4	537	301	7	528	7.44	1.67
E5	537	199	33	452	88.6	0.53
E6	537	300	6	526	9.99	0.53
E7	537	301	3	524	12	1.67
E8	537	231	27	478	58.7	0.53
E9	537	288	18	526	8.57	2.68
E10	537	206	30	456	77.6	2.68
E11	537	267	22	509	26.49	2.68
E12	537	300	9	529	7	0.53
E13	537	182	41	443	91.45	2.68
E14	537	161	21	402	134.1	0.53
E15	537	182	38	440	94,45	2.68
E16	537	301	12,33	533,33	2	1.67

### Annex 3

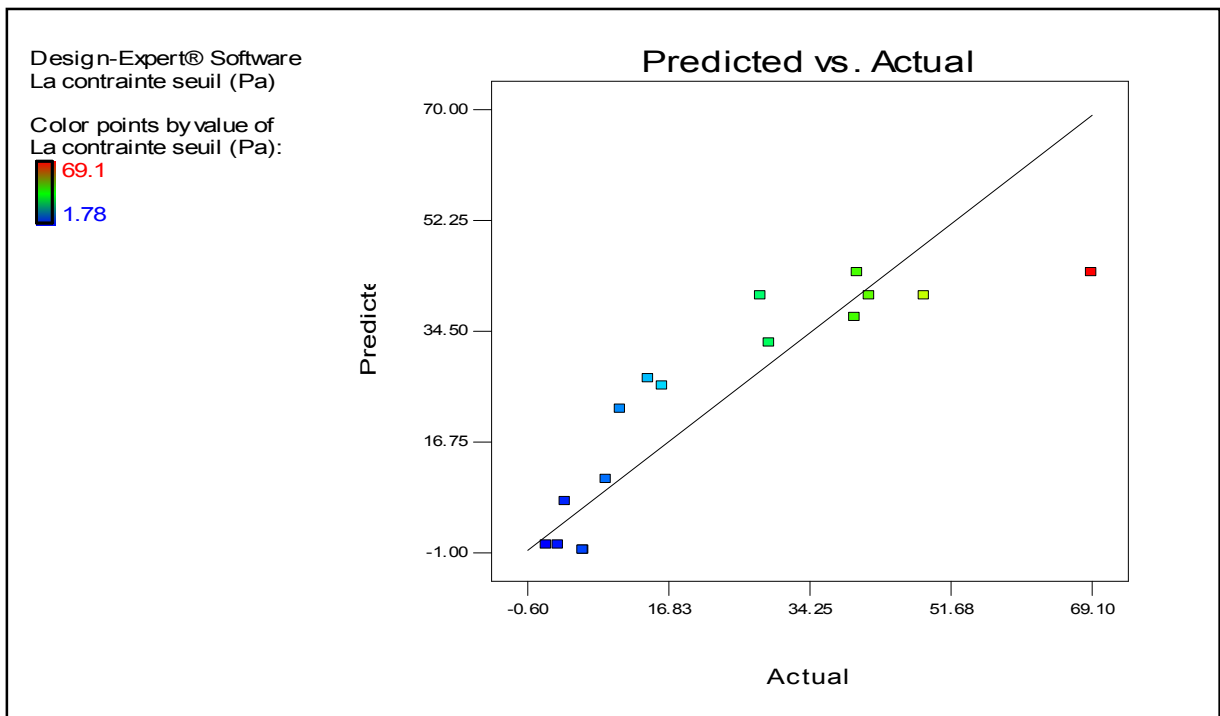


**Figure 1:** Rhéomètre type METTLER RM180

**Annexe 4**



**Figure 2 :** Variation des valeurs de la viscosité plastique de Casson prédites en fonction des valeurs observées.



**Figure 3 :** Variation des valeurs de la contrainte seuil prédites en fonction des valeurs observées.

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)

### Annexe 5

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
masse	is in range	30	56	1	1	3
beurre	is in range	2.52394	28.8999	1	1	3
lécithine	is in range	0.1	0.5	1	1	3
La contrainte se	is in range	4	32	1	1	3
La viscosité de l	is in range	2.1	3.9	1	1	3

Solutions							
Number	masse	beurre	lécithine	La contrainte se	La viscosité de l	Desirability	
1	<u>45.366</u>	<u>13.141</u>	<u>0.493</u>	<u>18.942</u>	<u>2.12817</u>	<u>1.000</u>	<u>Selected</u>
2	47.215	11.325	0.460	22.642	2.43284	1.000	
3	43.694	15.190	0.116	22.9868	2.12383	1.000	
4	46.420	12.175	0.405	22.3148	2.34822	1.000	
5	44.155	14.598	0.247	21.3678	2.1065	1.000	
6	50.241	8.417	0.342	29.8822	2.97499	1.000	
7	50.768	7.933	0.300	31.5472	3.08422	1.000	
8	44.535	14.198	0.268	21.6394	2.15117	1.000	
9	48.203	10.384	0.413	25.1667	2.61574	1.000	
10	47.819	11.034	0.147	29.3713	2.735	1.000	

10 Solutions found

**Figure 4** : les formules obtenues par l'optimisation.