

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des sciences et de la technologie

Département de Génie des procédés

Mémoire de Projet de fin d'Etudes

2^{ème} Année Master

Thème :

**Qualité Du Concentré De Tomate Local : Analyses
Intégrées Et Modélisation D'Inhibiteurs Enzymatiques**

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Présenté par :

Bouras Sabrine

Hamada Yousra

Sous la direction de :

Dr CHOUARFA.F

Juin 2025



Remerciements

*Premièrement, nous remercions **Dieu**, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la puissance durant ces longues années d'études et d'avoir nourri la force et la détermination d'accomplir ce travail.*

*Nous souhaitons remercier notre encadrante **Dr. Chouarfa Fella** pour son implication, le temps qu'elle nous a consacré et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont à tout le personnel de **la conserverie Amor Benamor** (Groupe CAB, Bouati Mahmoud, Guelma), sans oublié le staff du laboratoire de contrôle de qualité qui nous a suivi, fourni des renseignements et répondu à nos questions durant la période de notre stage.*

Nous tenons à remercier les membres de jury, pour leur présence, pour leur lecture attentive de ce mémoire, ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail

Enfin, nous remercions toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.





DÉDICACE

Grace à **Dieu** tout clément et miséricordieux, qui m'a tracé la route, et ma donnée le pouvoir et le courage de continuer jusqu'à la fin.

Je dédie ce modeste travail :

A mon cœur battant, ma chère mère, grâce à tes prières sincères et à ta foi inébranlable, je suis arrivée où je suis aujourd'hui. Mes mots sont impuissants à décrire l'immensité de ta grâce.

A l'âme de mon cher père, que Dieu lui fasse miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis. Je lui dédie le fruit de cet humble effort, puisse-t-il satisfaire son âme pure.

*Mes adorables sœurs, **Douaa** et **Ritadje**.*

*A mes chères Cousines, **Ibtissam** et **radja**.*

*A Mes chères amie **Yousra**, **Soundous** et **Amel**.*

*A mon encadreur **Dr. Chouarfa Fella** envers qui je dois le plus grand respect et la profonde gratitude.*

*A Groupe **CAB**.*

*A mon très cher binôme **Yousra**.*

Sabrine





DÉDICACE

Grace à **Dieu** tout clément et miséricordieux, qui m'a tracé la route, et ma donnée le pouvoir et le courage de continuer jusqu'à la fin.

A mon père Salem,

Mon soutien le plus sincère, celui qui a orné mon nom des plus beaux titres, qui m'a soutenue sans limites, et m'a appris que la réussite est un combat dont l'arme est le savoir.

A ma mère Samia,

Ce cœur plein de tendresse, qui m'a enveloppée de son amour avant même ses bras, et qui a facilité les épreuves par ses prières. A mon ciel et mon paradis.

A ma sœur Soumia et mon frère Adem,

Vous êtes l'espace qui ne se rétrécit jamais, l'ombre qui ne disparaît pas, c'est entre vous que mon rêve est né et a grandi.

A mon neveu Djawad,

A mon fiancé,

Tu as été une lumière dans l'obscurité de mes jours.

A ma chère cousine Sabrina,

Merci pour ton soutien et ta présence à mes côtés.

A mon encadreur Dr. Chouarfa Fella

Envers qui je dois le plus grand respect et la profonde gratitude.

A mon amie Sabrina,

Ma compagne de route et de lutte, nous ne serions jamais arrivés là sans notre sincérité, notre travail et notre volonté partagés. La moitié de cette réussite et de cette reconnaissance t'appartient.

YOUSRA



Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : présentation générale de la tomate	
I.1.Introduction.....	5
I.2.Définition de la tomate.....	5
I.3.Origine de la tomate.....	5
I.4.Composition de la tomate fraîche	6
I.5.Classification de la tomate.....	6
I.6.Variétés et formes de tomates.....	7
I.7.Types de la tomate.....	8
I.8.Nomenclature des différents produits à base de tomate.....	9
I.9.Caractéristiques du concentré de tomate.....	9
I.10.Caractéristiques de la tomate destinée à la transformation	10
I.11.Production de la tomate industrielle.....	11
I.11.1.Production mondiale.....	11
I.11.2.Production en Algérie.....	12
I.12.Importance de la tomate	13
I.12.1.Importance nutritionnelle	13
I.12.2.Importance médicinale.....	14
I.13.Conclusion	14
Chapitre II : Aspects technologiques et approche rhéologique	
II.1.Introduction.....	19
II.2.Procédé technologique de fabrication du concentré de tomate	19
II.2.1.Présentation de l'unité de stage	19
II.2.2. Étapes technologiques de transformation du concentré de tomate	19
II.2.2.1.Récolte.....	19
II.2.2.2.Réception et lavage	20
II.2.2.3.Triage.....	21
II.2.2.4.Broyage.....	21
II.2.2.5.Préchauffage.....	22
II.2.2.6.Passoire.....	22
II.2.2.7.Extraction et raffinage.....	22
II.2.2.8.Concentration.....	23
II.2.2.9.Pasteurisation.....	23
II.2.2.10.Remplissage et sertissage.....	24
II.2.2.11.Stérilisation des boîtes	24
II.2.2.12.Refroïdissement.....	25
II.2.2.13.Séchage et conditionnement	25
II.3.Approche rhéologique.....	27
II.3.1.La rhéologie.....	27
II.3.2.Rhéomètre	27
II.3.2.1.Domaine d'application de rhéomètre.....	27
II.3.3.Définition et lois générales	27
II.3.3.1.Viscosité.....	27
II.3.3.2.Contrainte de cisaillement	28
II.3.3.3.Vitesse de cisaillement.....	28
II.3.4.Mesure oscillatoire	29

II.3.5.Comportement rhéologique des fluides.....	29
II.4.Conclusion	30
Chapitre III : Matériels et méthodes	
III.1.Introduction.....	34
III.2.Echantillonnage	34
III.3.Analyses physico-chimiques.....	34
III.3.1.Contrôle du poids.....	35
III.3.2.Contrôle du pH.....	35
III.3.3.Contrôle de la température.....	36
III.3.4.Contrôle du Brix	37
III.3.5.Contrôle de la couleur.....	38
III.3.6.Contrôle de la consistance.....	39
III.3.7.Contrôle de l'acidité.....	40
III.3.8.Test de stabilité.....	41
III.4.Analyses rhéologiques	42
III.4.1.Dispositifs expérimentaux.....	42
III.4.2.Principe de fonctionnement du rhéomètre.....	44
III.5.Conclusion	45
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1.Introduction.....	48
IV.2.Résultats des analyses physico-chimiques du concentré de la tomate.....	48
IV.2.1.Détermination du poids net	48
IV.2.2.Détermination du pH	49
IV.2.3.Détermination du Brix	50
IV.2.4.Détermination de la couleur	51
IV.2.5.Détermination de la consistance.....	53
IV.2.6.Détermination de l'acidité	53
IV.2.7.Test de stabilité	54
IV.3.Comportement rhéologique du concentré de la tomate.....	56
IV.3.1.Régime permanent.....	56
IV.3.1.1.Evolution de la contrainte.....	57
IV.3.1.2.Evolution de la viscosité.....	57
IV.3.2.Régime oscillatoire	58
Chapitre V : Docking moléculaire	
V.1.Introduction	63
V.2.Docking moléculaire.....	63
V.2.1.Etapes de docking moléculaire	64
V.2.2.Démarche pratique du docking.....	64
V.2.3.Outils utilisés	65
V.2.4.Matériaux utilisés.....	65
V.2.4.1.Récepteur	65
V.2.4.2.Ligand.....	66
V.3.Grid Box.....	67
V.4.Calcul de la RMSD.....	67
V.5.Energie de liaison de docking moléculaire.....	69
V.6.Interaction protéine/ligand.....	70
V.7.Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	78
Annexes	
Résumés	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Diffusion de tomate dans le monde.....	6
Figure I.2: Principales formes de tomates.....	8
Figure I.3: Diversité des formes, tailles et couleurs des fruits de tomates.....	8
Figure I.4: Principaux pays producteurs de tomates en 2022.....	12
Figure I.5: Production de tomate en Algérie en 2016.....	13

Chapitre II

Figures II.1: Réception de la tomate.....	20
Figures II.2: Lavage de la tomate.....	21
Figures II.3: Triage de la tomate.....	21
Figures II.4: Broyeur.....	22
Figures II.5: Préchauffeur.....	22
Figures II.6: Concentration sous vide.....	23
Figures II.7: Système de pasteurisation	24
Figures II.8: Doseuse.....	24
Figures II.9: Stérilisateur.....	25
Figures II.10: Séchoirs.....	25
Figures II.11: Processus de fabrication de concentré de tomate.....	26
Figures II.12: Cisaillement dans le cas du modèle à deux plaques.....	28
Figures II.13: Rhéogrammes des fluides newtoniens.....	29
Figures II.14: Rhéogramme des fluides non newtoniens.....	30

Chapitre III

Figure III.1: Echantillons analysés.....	34
Figure III.2: Mesure du poids.....	35
Figure III.3: Mesure du pH.....	36
Figure III.4: Mesure de la température.....	37
Figure III.5: Détermination du Brix par réfractomètre.....	37
Figure III.6: Détermination de la couleur par spectrophotomètre.....	39
Figure III.7: Mesure de la consistance par le consistomètre de Bostwick.....	40
Figure III.8: Filtration et titration par NaOH.....	41
Figure III.9: Contrôle de stabilité (Etuve de 32°C et 55°C).....	42
Figure III.10: Dispositifs expérimentales de l'étude rhéologique.....	43

Chapitre IV

Figure IV.1: Histogramme des poids des trois échantillons analysés.....	49
Figure IV.2 : Histogramme du pH des trois échantillons analysés.....	50
Figure IV.3: Histogramme du Brix des trois échantillons analysés.....	51
Figure IV.4: Histogramme de la couleur des trois échantillons analysés.....	52
Figure IV.5: Histogramme de la consistance des trois échantillons analysés.....	53
Figure IV.6: Histogramme de l'acidité des trois échantillons analysés.....	54
Figure IV.7: Evolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement.....	57
Figure IV.8: Evolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.....	58
Figure IV.9: Les modules G' et G'' en fonction de la déformation.....	59

Chapitre V

Figure V.1: Illustration schématique du processus de docking.....	63
Figure V.2: Représentation schématique des étapes du docking moléculaire.....	64
Figure V.3: Structure de squelette polypeptidique de PPO et POD.....	66
Figure V.4: Position de GRID BOX dans le site actif de polyphénoloxydase PPO.....	67
Figure V.5: Validation de re-Docking : couleur jaune X-ray, gris résultat Dock.....	68
Figure V.6: Les interactions entre les sites actifs de PPO et l'acide ascorbique.....	70
Figure V.7: Les interactions entre les sites actifs de PPO et l'acide citrique.....	71
Figure V.8: Les interactions entre les sites actifs de POD et l'acide ascorbique.....	71
Figure V.9: Les interactions entre les sites actifs de POD et l'acide citrique.....	72

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Composition de la tomate fraîche.....	6
Tableau I.2: Classification des tomates.....	7
Tableau I.3: Caractéristiques organoleptiques de concentré de tomate.....	10
Tableau I.4: Caractère physico-chimique et teneur en résidu sec du concentré de tomate..	10
Tableau I.5: Valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g de tomate crue.....	13

Chapitre II

Tableau II.1: Durée de stérilisation en fonction de volume.....	25
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1: Résultats des mesures de poids des trois échantillons.....	48
Tableau IV.2 : Résultats du pH des trois échantillons.....	49
Tableau IV.3 : Résultats du Brix des trois échantillons.....	50
Tableau IV.4 : Quantité de DCT et H ₂ O.....	51
Tableau IV.5 : Résultats des mesures de couleur des trois échantillons.....	52
Tableau IV.6 : Résultats de la consistance des trois échantillons.....	53
Tableau IV.7 : Résultats de l'acidité des trois échantillons.....	54
Tableau IV.8 : Résultats de test de stabilité pour ZAHRA.....	55
Tableau IV.9 : Résultats de test de stabilité pour CAB.....	55
Tableau IV.10 : Résultats de test de stabilité pour HELLO.....	56

Chapitre V

Tableau V.1 : Structures extraites de la base pdb.....	66
Tableau V.2 : Représentation des ligands en 2D et 3D.....	67
Tableau V.3 : $\Delta G_{\text{binding}}$ (Kcal/mol), prédite par AutoDock Vina des composés étudiés.....	69
Tableau V.4 : Les interactions hydrogène du polyphénoloxydase (PPO) avec les ligands...	72
Tableau V.5 : Les interactions hydrogène de la peroxydase (POD) avec les ligands.....	73

Liste des abréviations

Abs	Absence
AFNOR	Association française de normalisation
IANOR	Institut Algérien de Normalisation
Å	Angstrom
a	La teneur de tomate en pigment rouge
a/b	La couleur de tomate (pigments rouges /pigments jaune)
b	La teneur de tomate en pigment jaune
BW	Bostwick
CAB	Conserver Amor Benamor
CVO	Continuons shear Viscosity Oscillation
°C	Degré Celsius
DCT	Double concentrée de tomate
E	Elastique
FAO	Food and Agriculture Organization
f	Fréquence
F	Force
G'	Module de conservation (en Pa)
G''	Module de perte (Pa)
Hz	Hertz
Kg	Kilogramme
Kcal	Kilocalorie
L	Luminosité de tomate
LAIGM	Laboratoire d'analyses industrielles et génie des matériaux
η	Viscosité dynamique (en Pa.s)
PDB	Protein Data Bank
PDBQT	Protein Data Bank, partial charge, torsion
pH	Potentiel hydrogène
Pa	Pascal
PPO	Polyphénol oxydase
POD	Peroxydase
RMN	Résonance magnétique nucléaire

RMSD	Root Mean Square Deviation
SCT	Simple concentrée de tomate
T°	Température
T	Tonne
TCT	Triple concentrée de tomate
τ	Contrainte de cisaillement (pa)
γ	Déformation de cisaillement (sans unité)
$\gamma \cdot$	Vitesse de cisaillement (en s ⁻¹)
%	Pourcentage

Introduction Générale

Introduction générale

L'agriculture constitue un pilier fondamental de l'économie mondiale et de la sécurité alimentaire, fournissant une diversité de produits essentiels à l'alimentation humaine. Parmi les cultures maraîchères, la tomate (*Solanum lycopersicum*), fruit-légume largement consommé, occupe une position stratégique tant pour ses qualités nutritionnelles que pour ses applications culinaires variées. Riche en fibres, en vitamines (notamment la vitamine C) et en composés antioxydants comme le lycopène, la tomate représente une source alimentaire de haute valeur ajoutée ^[1].

Sur le plan industriel, la transformation de la tomate en produits dérivés tels que les concentrés, sauces, jus ou purées est largement répandue à travers le monde. Cette activité agroalimentaire repose sur des procédés rigoureux visant à garantir la sécurité, la stabilité et la qualité organoleptique des produits finis. La maîtrise de la matière première, associée à des techniques analytiques de contrôle, joue un rôle déterminant dans la standardisation et la compétitivité de ces produits sur les marchés ^[2].

Dans ce contexte, notre travail s'inscrit dans une double approche expérimentale et théorique, visant à évaluer la qualité de trois échantillons commerciaux de concentré de tomate (Hello, Zahra et CAB), tout en explorant, à l'échelle moléculaire, les mécanismes enzymatiques responsables de leur dégradation potentielle.

La première partie de cette étude est consacrée à la caractérisation physico-chimique et rhéologique des concentrés, à travers des analyses effectuées dans deux laboratoires : le laboratoire central de la conserverie Amor Benamor (CAB) pour les essais physico-chimiques, et le laboratoire d'analyses industrielles et de génie des matériaux (LAIGM) de l'Université de Guelma pour les mesures rhéologiques. Ces analyses permettent de vérifier la conformité des échantillons aux normes en vigueur, d'évaluer leur stabilité et leur comportement mécanique, paramètres essentiels pour le conditionnement et la transformation industrielle.

La seconde partie repose sur une approche *in silico* par docking moléculaire, utilisant le logiciel AutoDock Vina. Cette méthode permet de simuler les interactions entre des ligands (acide ascorbique et acide citrique) et deux enzymes cibles : la polyphénoloxydase (PPO) et la peroxydase (POD). Ces enzymes jouent un rôle clé dans les processus d'oxydation responsables de la détérioration des qualités organoleptiques et nutritionnelles des tomates en conserve. L'objectif est d'évaluer le potentiel inhibiteur de ces acides organiques naturels et de mieux comprendre leurs mécanismes d'action au niveau des sites actifs enzymatiques.

Ainsi, ce mémoire s'articule autour des objectifs suivants :

- Évaluer les caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques de trois concentrés de tomate afin de juger leur qualité technologique ;
- Étudier, à travers la modélisation moléculaire, l'efficacité de l'acide ascorbique et de l'acide citrique à inhiber les enzymes PPO et POD, contribuant ainsi à préserver la stabilité des produits transformés.

Ce travail est structuré en cinq chapitres :

- **Le premier chapitre** présente les aspects généraux liés à la tomate, incluant sa botanique, sa composition, ses variétés et son importance agronomique et industrielle.
- **Le deuxième chapitre** décrit le processus de transformation industrielle de la tomate, notamment la fabrication du concentré, ainsi que les principes fondamentaux de la rhéologie appliquée.
- **Le troisième chapitre** détaille les matériels, méthodes et protocoles utilisés pour les analyses de laboratoire.
- **Le quatrième chapitre** est dédié à la présentation et à l'interprétation des résultats analytiques.
- **Le cinquième chapitre** traite de l'approche par docking moléculaire, en présentant les résultats des simulations et leurs implications pour la conservation des produits.

Enfin, une conclusion générale vient clore ce travail en synthétisant les résultats obtenus et en mettant en évidence la complémentarité entre l'analyse en laboratoire et la modélisation moléculaire, chacune apportant un éclairage spécifique sur la qualité et la stabilité des produits agroalimentaires transformés.

Références bibliographiques

- [1] **Dorais, M., Ehret, D. L., & Papadopoulos, A. P, (2008)**, Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: From the seed to the consumer. *Phytochemistry Reviews*, 7(2), 231–250.
- [2] **Seymour, G. B., Taylor, J. E., & Tucker, G. A. (Eds.), (1993)**, *Biochemistry of Fruit Ripening*. Doi: 10.1007/978-94-011-1584-1.

Chapitre I :

Présentation Générale De La Tomate

I.1. Introduction

La tomate occupe une place centrale dans l'alimentation humaine à travers le monde. Appréciée pour sa richesse nutritionnelle, sa saveur et sa polyvalence culinaire, elle est aussi l'un des légumes les plus cultivés et consommés à l'échelle mondiale. Ce chapitre présente une vue d'ensemble de ce fruit-légume incontournable, en abordant successivement sa définition botanique, son origine géographique, ainsi que sa composition chimique. Nous explorerons également les différentes classifications adoptées, les variétés et formes existantes, les types de tomates cultivées, et enfin, les tendances de production mondiale et locale. Cette présentation constitue une base essentielle pour comprendre l'intérêt scientifique, nutritionnel, industriel ou encore agronomique de la tomate.

I.2. Définition de la tomate

La tomate fait partie de famille des solanacées. Elles sont souvent de forme sphérique ou ovale, de couleur rouge, la tomate est devenue, cinq siècles après leur découverte, le premier légume-fruit consommé en Italie et France.

Cette plante est cultivée en plein champ ou sous presque toutes les latitudes, sur une superficie d'environ trois millions d'hectares, ce qui représente près du tiers des surfaces mondiales consacrées aux légumes. La tomate a donné lieu au développement d'une importante industrie de transformation, pour la production de concentré, de sauces, de jus et de conserves^[1].

I.3. Origine de la tomate

L'origine de la tomate est très déroutante Mais probablement le premier La tomate connue pousse à l'état sauvage Ouest de l'Amérique du sud les Andes sont devenues Pérou, Bolivie, nord du Chili et l'Equateur. Les ancêtres des Incas et les Aztèques ont été les premiers 700, pratiquez la culture de ces enfants fruit de la taille d'une cerise ^[2].

Les Aztèques et les Mayas ont adopté dans leur alimentation la culture a commencé à se développer. Lorsque les espagnols ont conquis le Mexique au début du XVIe siècle, les tomates étaient là largement établies, et en l'ensemble de l'Amérique du sud ^[2].

L'introduction des tomates européennes bien sûr, c'est à cause des espagnols. Il y a traditionnellement un prêtre espagnol reviens du Pérou, ramène les graines à Séville, mais plus probable de l'un des premiers explorateurs Espagnol, Christophe Colomb ou Hernan Cortes (Figure I.1) ^[2].

En Algérie, elle a été introduite par les cultivateurs du sud de l'Espagne, étant donné que les conditions se sont montrées propices. Sa consommation a commencé dans la région d'Oran en 1905, puis elle s'est étendue vers le centre, notamment dans le littoral algérois ^[3].



Figure I.1: Diffusion de tomate dans le monde ^[4].

I.4. Composition de la tomate fraîche

Les tomates fraîches ont une composition biochimique qui dépend de plusieurs facteurs, de la maturité, de la lumière, de la température, de la saison, de l'élevage, de l'irrigation et des pratiques culturales. Le jus, forme la plupart des composants physiques des tomates.

Les tomates se composent de 94 à 96% de jus, de 1 à 1,5% de graines et de 1,5 à 2,5 % de pelures et de fibres. Les sucres de tomates sont principalement des sucres réducteurs, le glucose étant de 0,88 à 1,25% et le fructose de 1,08 à 1,48% ^[5].

Tableau I.1: Composition de la tomate fraîche ^[6].

Eau (%)	Glucides (%)	Substances azotées (%)	Lipides (%)	Cendres (%)
93,5	3,6	0,95	0,30	0,74

I.5. Classification de la tomate

➤ Classification botanique

La classification des tomates dépend principalement du type de croissance, de nature génétique, de la forme et de la taille des fruits, du nombre moyen de parties par fruit, de la résistance aux maladies, de la qualité commerciale et industrielle de la variété ^[7]. Le cultivar ou "esculentum" complète le nom de l'espèce qui vient du latin et signifie "comestible". Ce terme comestible ne concerne ni le feuillage, ni les petits fruits verts car ils contiennent des alcaloïdes toxiques (tomatine, solanines). Le tableau I.2 suivant présente la classification botanique de la tomate ^[5].

Tableau I.2: classification des tomates.

Règne	Plante
Sous-règne	Trachenobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Asteride
Ordre	Solonaces
Famille	Solonaceae
Genre	Solanum ou lycopersicon
Espèce	Lycopersicon esculentum Mill

➤ Classification génétique

La tomate est une plante autogame, mais un certain pourcentage de croisements croisés peut se produire, ce qui lui permet de se comporter comme une plante allogame ^[8].

Il existe deux grands types de variétés de tomate (selon la méthode de reproduction) :

◆ Variétés fixées

Elles se caractérisent par leur homogénéité génétique, conservant les qualités parentales au fil des générations ^[9]. Leurs fruits sont généralement réguliers, parfois plus sensibles aux maladies, mais ils présentent souvent une excellente qualité gustative ^[10].

◆ Variétés hybrides

Elles bénéficient de l'effet d'hétérosis (ou vigueur hybride), qui permet l'accumulation de gènes favorables, une meilleure résistance aux maladies et une tenue supérieure des fruits dans des conditions environnementales parfois défavorables ^[9].

I.6. Variétés et formes de tomates

Il existe des milliers de variétés de tomates. En Europe, 3580 variétés sont maintenues et commercialisées, dont 442 en France. On distingue quatre grandes familles, classées selon la taille de leurs fruits : les tomates à gros fruits (100g et plus), les tomates cocktail, à fruits moyens (entre 30 et 50 g). Les tomates cerises, à petits fruits (15 à 20 g) et enfin les tomates groseilles, à très petits fruits (moins de 15g).

La grande diversité des tomates ne se limite pas à la taille ; elle inclut également une large variété de formes et de couleurs, comme l'illustrent la figure I.2 (principales formes de tomates) et la figure I.3 (diversité des formes, tailles et couleurs des fruits de tomates).

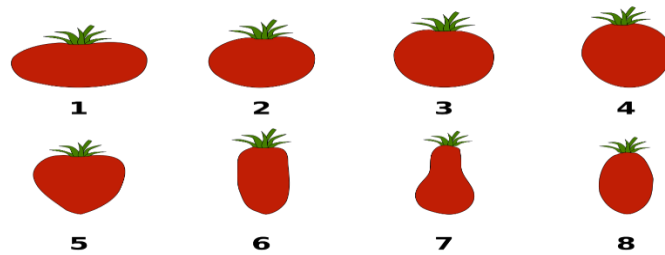


Figure I.2: Principales formes de tomates ^[11].

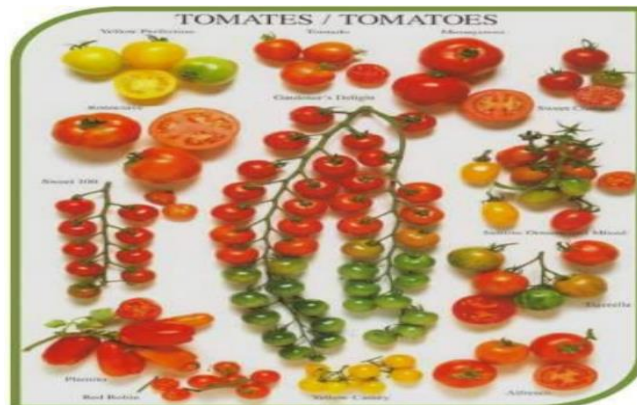


Figure I.3: Diversité des formes, tailles et couleurs des fruits de tomates ^[12].

I.7. Types de tomate

➤ Tomate de table

Ces tomates sont de gros calibres, moins rouges que les variétés industrielles, riches en pépins et en eau, avec une peau peu résistante. Elles sont principalement utilisées en salade ou transformées en purée pour la préparation de sauces. Leur rendement à l'hectare est faible comparé à celui des tomates industrielles ; elles ne sont donc pas adaptées à une transformation industrielle à grande échelle ^[13].

➤ Tomate industrielle

Ces tomates, souvent plus petites et parfois allongées, présentent une couleur rouge intense, très recherchée pour la fabrication de sauces. Elles contiennent un taux de matières sèches plus élevé et possèdent une peau plus résistante. Comme leur nom l'indique, ce sont ces tomates qui conviennent le mieux à la transformation industrielle. Leur culture est peu connue des paysans et n'est pratiquée que par quelques maraîchers spécialisés. Cela signifie que toute action visant à améliorer la conservation des tomates doit impérativement tenir compte des variétés produites. Or, les variétés cultivées localement (tomates de table) ne sont pas adaptées aux techniques actuelles de conservation et de transformation. Il est donc nécessaire de résoudre un premier problème agronomique, en optant pour des variétés mieux adaptées à l'industrie.

Les avantages d'un tel choix sont évidents :

- Un meilleur rendement à l'hectare
- La possibilité de transformer efficacement la production ^[13].

I.8. Nomenclature des différents produits à base de tomate

La tomate est largement utilisée dans l'industrie alimentaire pour la préparation de divers produits dérivés tels que la pulpe, la sauce, le jus, la purée, le concentré et la poudre de tomate ^[14].

♦ Purée de tomate

La purée de tomate concentrée est un produit obtenu par tamisage de fruits de tomate frais, puis concentré par élimination partielle de l'eau qu'ils contiennent.

♦ Concentré de tomate

Le concentré de tomate est préparé en utilisant des évaporateurs à circulation forcée, permettant d'atteindre des concentrations de matière sèche d'environ 22 %.

♦ Double concentré de tomate

Les doubles concentrés de tomate sont des produits dont le rapport résidu sec/eau est d'environ 28 %.

♦ Triple concentré de tomate

Les triples concentrés de tomate sont des produits dont le rapport résidu sec/eau atteint 36 %.

♦ Pulpe de tomate

La pulpe de tomate est obtenue à partir de tomates écrasées, avec ou sans élimination préalable des peaux et des graines.

♦ Confiture de toomate

La transformation de la tomate en confiture varie selon les régions. En France, la confiture de tomates vertes est la plus répandue, tandis qu'en Amérique du Sud, notamment en Argentine, c'est la confiture de tomates rouges qui est privilégiée. Elle est souvent parfumée aux clous de girofle et au sucre roux pour rehausser son goût.

I.9. Caractéristiques du concentré de tomate

➤ Caractères organoleptiques

Les caractéristiques organoleptiques, à savoir la couleur, la texture, la saveur, et l'odeur du concentré de tomate, sont représentées dans le tableau I.3 ^[15].

Tableau I.3: Caractéristiques organoleptiques de concentré de tomate.

Couleur	▪ Rouge caractéristiques de tomate mures.
Texture	▪ Sensiblement homogène. ▪ Pas de séparation en deux phases liquide et solide.
Saveur	▪ Absence de saveurs étrangères, Notamment le gout de brûlé ou de caramel.
Odeur	▪ Absence d'odeurs étrangères ou anormales.
Impuretés	▪ Présence tolérée d'impuretés naturelles végétales, visibles seulement après examen microscopique attentif.

➤ Caractères physico-chimiques

Les caractères physico-chimiques, notamment les teneurs en résidus secs des concentrés de tomate, sont rapportés dans le tableau I.4 ^[16].

Tableau I.4: Caractère physico-chimique et teneur en résidu sec du concentré de tomate.

Caractère	Teneur de résidus secs
Teneur minimum en sucre totaux.	45%
Acidité totale maximum (exprimé en acide citrique hydrate).	10%
Teneur maximum en impuretés insolubles.	0.1%
Acidité totale maximum (acide acétique).	1%
Teneur en sel alimentaire.	3 à 15 %

I.10. Caractéristiques de la tomate destinée à la transformation

Les tomates utilisées pour la préparation de concentré doivent répondre à un certain nombre de critères de qualité. Les fruits doivent être fermes, sains, résistants à l'éclatement et à l'écrasement au moment de la récolte, durant le transport et le stockage. Cependant, d'autres critères doivent également être considérés :

➤ Calibre de fruit

Le fruit doit être de grand calibre, ce qui permet de réduire la main-d'œuvre nécessaire à la récolte et au titrage ^[17]

➤ pH

Le pH du produit à transformer doit être inférieur à 4,5 afin de limiter le temps de stérilisation nécessaire pour préserver la qualité du produit fini.

➤ **Couleur du fruit**

La couleur doit être d'un rouge caractéristique, tant pour la peau du fruit que pour la pulpe ^[17].

➤ **Extrait sec**

L'extrait sec total du fruit de tomate est essentiel pour l'élaboration du concentré. Plus l'indice de réfractométrie est élevé, moins il faut de kg de tomate fraîche pour fabriquer 1 kg de double concentré à 28 %.

➤ **Pectines**

Le fruit doit avoir une teneur élevée en substances pectiques (entre 1,2 et 1,5 %) afin d'augmenter la consistance du produit fini ^[17].

➤ **L'acidité**

Tout aussi importante que le pH, la teneur en acide citrique dans la tomate ne doit pas être inférieure à 0,35 %.

I.11. Production de la tomate industrielle

I.11.1. Production mondiale

La production mondiale de tomate a battu des records en 2016. La Chine se place en tête de classement, tandis que les Pays-Bas ont le meilleur rendement. Le Maroc se positionne à la 18^e place.

Selon les données de la FAO, la production mondiale de tomate a battu des records au cours de l'année 2016 avec 177 042 000 T, ce volume montre une progression de 29.08% en 10 ans. La superficie consacrée était de 4 782 754 hectares, ce qui représente un rendement moyen par mètre carré de 37 kilos de tomates.

Les Pays-Bas ont enregistré le meilleur rendement avec 50,7 kg /m² contre 8,62 Kg/m² en Espagne et 8.08 Kg/m² au Maroc ^[18].

• **Principaux producteurs mondiaux :**

La Chine occupe la première place du classement avec une production de 56 308 910 tonnes, représentant 31,8 % de la production mondiale. Elle est suivie par l'Inde, dont la production s'élève à 18 399 000 tonnes, bien que son rendement reste relativement faible, avec 2,42 kg/m². Les États-Unis arrivent ensuite avec 13 038 410 tonnes et un rendement notable de 9,03 kg/m², suivis de la Turquie, quatrième au classement avec 12 600 000 tonnes. En cinquième position, l'Égypte enregistre une production de 7 943 000 tonnes. Par ailleurs, plusieurs pays du Moyen-Orient tels que l'Iran, la Jordanie et la Syrie se distinguent également comme producteurs notables de tomates ^[18].

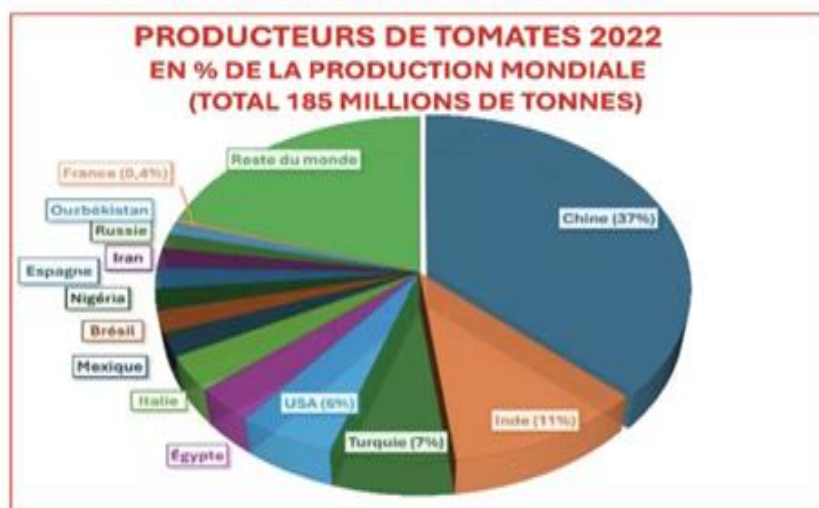


Figure I.4: Principaux pays producteurs de tomates en 2022 ^[19].

I.11.2. Production en Algérie

Les tomates d'industrie sont principalement cultivées au Nord-est du pays : les wilayas d'El Taraf, Annaba, Guelma, Skikda représentent à elles seules 90% de la superficie totale consacrée à cette culture en Algérie ^[20].

La production de la tomate, en Algérie, est influencée par les caractéristiques climatiques régionales et les variétés productives. Elle est répartie comme suit :

- **Les productions de saison** : représentent la plus grande part des superficies maraîchères localisées dans les tells et les régions suffisamment arrosées ou disposant d'eau d'irrigation (périmètres irrigués, oasis, et.).
- **Les productions d'arrière-saison** : arrivent sur les marchés à partir du mois de novembre. Elles sont localisées dans le littoral, les plaines sub-littorales, les plaines intérieures et les hautes plaines bénéficiant d'infrastructures et d'eau pendant l'été et l'automne.
- **Les productions de primeur** : réservées aux zones à climat doux. C'est pour cette raison qu'elles sont confinées dans les zones littorales et quelques micros zones du sud.

La figure I.5 ci-après présente les données relatives à la production de tomate par wilaya pour l'année 2016 ^[21]

.

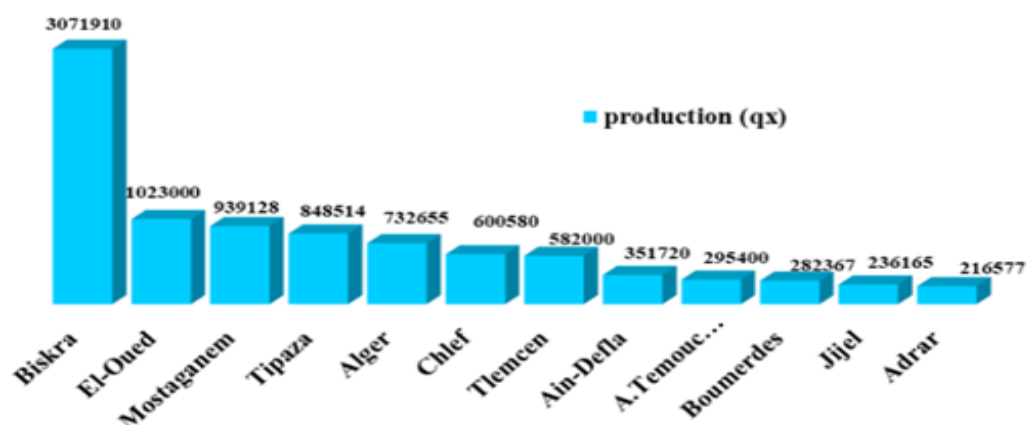


Figure I.5: Production de tomate en Algérie en 2016 ^[20].

I.12. Importance de la tomate

I.12.1. Importance nutritionnelle

La tomate est cultivée principalement pour ses fruits, qui peuvent être consommés frais, cuits ou transformés industriellement. Elle est une excellente source de vitamine C et de minéraux essentiels ^[22]. De plus, la tomate est riche en antioxydants phénoliques, notamment le lycopène, reconnu pour ses propriétés anticancéreuses et son rôle dans la prévention des maladies cardiovasculaires. C'est un aliment diététique, contenant entre 93 et 95 % d'eau et très faible en calories, avec seulement 8 à 20 Kcal pour 100 g (Tableau I.5). La tomate mûre renferme également divers pigments de la famille des caroténoïdes, dont le bêta-carotène, qui possède une activité provitaminique A ^[23].

Tableau I.5: Valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g de tomate crue.

L'élément	La teneur / 100 g
Eau	94.5 g
Energie	18 Kcal
Fer	0.4 mg
Calcium	9 mg
Magnésium	11 mg
Potassium	266 mg
Sodium	5 mg
Glucides	2.8 g
Lipides	0.2 g
Protides	0.9 g
Fibres	1.2 g
Vit C	23 mg

I.12.2. Importance médicinale

La tomate est reconnue pour ses usages traditionnels en phytothérapie, principalement en raison de sa richesse en pigments caroténoïdes antioxydants, et plus particulièrement en lycopène. Ce dernier est réputé pour ses propriétés anticancéreuses et son rôle préventif contre les maladies cardiovasculaires. Il est important de noter que le lycopène est mieux assimilé lorsque les tomates sont consommées cuites, la cuisson libérant les nutriments en brisant les cellules végétales ^[24,25]. L'utilisation médicinale de la tomate remonte à l'époque des Incas en Amérique du Sud, qui employaient les feuilles fraîches de la plante comme antibiotique. De plus, la consommation de tomates contribue à divers bienfaits pour la santé, tels que :

- Accélérer la formation de sucre dans le sang, ce qui permet au corps de combattre la fatigue.
- Diminuer l'hypertension grâce à son haut taux de potassium.
- Contenir des traces d'éléments antitoxiques (chlorite et sulfure), excellents pour la santé du foie.
- Stimuler les sécrétions digestives grâce à sa saveur acidulée ^[26].
- Contribuer à la prévention des maladies cardiovasculaires, de l'artériosclérose et de la cécité : une autre étude menée chez les femmes a démontré que ce même fruit pourrait réduire leurs risques de souffrir de maladies cardiovasculaires et baisser le taux de leurs lipoprotéines de basse densité. Les chercheurs pensent que ses effets bénéfiques pourraient être dus au lycopène, associé à d'autres composés antioxydants et vitamines.
- Certaines études publiées par l'United States National Library of Medicine ont révélé que la consommation fréquente ou régulière de tomates pourrait réduire le risque de développer le cancer de la prostate, ainsi que d'autres tumeurs malignes, telles que les cancers du pancréas, du poumon, du côlon, du rectum, de l'estomac, de la cavité orale, de l'œsophage, du sein et du col de l'utérus ^[24,25].

I.13. Conclusion

En résumé, la tomate est un fruit-légume d'une grande importance tant sur le plan alimentaire que nutritionnel et économique. Ce chapitre a mis en lumière sa définition botanique, ses origines riches et variées, ainsi que sa composition chimique, qui lui confère de nombreux bienfaits pour la santé.

Nous avons également examiné les différentes classifications, variétés et formes de tomates, révélant la diversité qui existe dans ce produit, ainsi que les types cultivés dans le monde entier. La production de tomates, un des secteurs agricoles les plus dynamiques, souligne l'importance

économique de ce fruit à l'échelle mondiale, contribuant à la sécurité alimentaire et à l'emploi dans de nombreux pays.

Enfin, les propriétés nutritionnelles et médicinales de la tomate renforcent son rôle en tant qu'aliment essentiel, riche en antioxydants, vitamines et minéraux. Sa consommation régulière est associée à divers bienfaits pour la santé, notamment la prévention des maladies cardiovasculaires et certains types de cancers. Ainsi, la tomate se présente non seulement comme un aliment de choix dans notre alimentation quotidienne, mais aussi comme un sujet d'intérêt scientifique et économique, justifiant pleinement son étude approfondie.

Références bibliographiques

- [1] **Léon, P MTG, (2009)**, «Magazine Trimestriel du centre technique horticole de Gembloux »,2.
- [2] **France C. (2001)**, La tomate : Un guide indispensable comprenant une liste complète de variétés et plus de 160 délicieuses recettes. Éditions manise frace. pp6, 256p
- [3] **Snoussi SA. (2010)**, Etude de base sur la tomate en Algérie. Rapport de mission programme régional de gestion intégrée des ravageurs pour le Proche-Orient. Rome, 52p.
- [4] **Balancard D., Laterrot H. Marchoux G et Candresse T. (2009)**, Les maladies de la tomate : Identifier, connaitre, maitriser. Editions QUAE c/o INRA RD 10 78026 Versailles cedex.paris, France .pp 18-30,679p.
- [5] **FoughaliAtti. B, KHELAIFIA .B. (2021)**, « Contribution aux suivis de la qualité du concentré de tomate de la conserverie ZIMBA et des eaux de chaudières » master de l'Université 8 Mai 1945 Guelma
- [6] **Saddek A, (2008)**, « Etude de la complémentation des pailles traitées L'ammoniac (PNH3) Avec les pulpes de Tomates en vue de Réduire la Dépendance Alimentaire des Ruminants Domestiques en Algérie ». Auropean journal of scientific research.
- [7] **Kolev. (1976)**, «Les cultures maraichères en Algérie. Tome I. Légumes fruits.Ed. Ministre de l'agriculture et des réformes Agricoles» .52.p.
- [8] **Gallais A, Bannerot H, (1992)**, «Amélioration des espèces végétales cultivées objectif et critères de sélection ». INRA, Paris. 765. p,
- [9] **chaux C.L et foury C.L., (1994)**. « Production légumières et maraichères, tome III : légumineuses potagères, légumes fruits». Tec & Doc. Lavoisier, Paris.563.p.
- [10] **Poleses J.M., (2007)**, « La culture de tomate ». Ed Artémis. 95. P.
- [11] «Agrodok», (2006), Wageningen, p.105.
- [12] **Benard C.,Gautier H.,Bourgaud F., Grasselly D., Navez B., Caris-Veryrat C.,weiss M., Genard M. (2009)**, "Effects of low Nitrogen Supply on Tomato (solanum lycopersicum) fruit Yield and Quality with special Emphasis on sugars, Acids,Ascorbate, Carotenoids, and phenolic Compounds." Journal of Agricultural and Food Chemistry 57(10) :4112p
- [13] Magazine trimestriel du centre technique horticole de Gembloux-N °27.juin2009.

- [14] **Goloubiev et chebane, (1988)**, Traitement par membrane de pulpe de tomate. Ind. Alim. Agric.10 :929-932.
- [15] **Boukharouba K, Hamici A, (2016)**, « Contribution à l'étude phytochimique, Evaluation d'une activité biologique et valorisation de deux plantes algériennes dans la conserverie CAB) », Master de l'Université 08 mai 1945 Guelma.
- [16] **Auteur inconnu, (1998)**, «Guide d'inspection qualité sur les concentrés de tomates », centre Algérien du contrôle de la qualité et de l'Emballage (CACQE), p1-19.
- [17] **Miladi, (1970)**, Introduction à la composition et la technologie de la tomate.INN Ed grand magreb, Tunisie, p.99.
- [18] Site web: <http://www.agrimaroc.ma/production-tomate-monde/>
- [19] Site web : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/agriculture-rechauffement-climatique -tomate-va-t-elle-emmener-france-oree-revolution-agricole-115517/>
- [20] **Bouزيد A, Bédrani S. (2013)**, « La performance économique de la filière tomate industrielle en Algérie ». Les cahiers du CREAD n103.
- [21] Site web : <https://agronomie.info/fr/generalites-sur-la-tomate/>.
- [22] **Philouze., J. laterrot., H. (1992)**, « Amélioration variétale de la tomate : objectifs et critères de selection. In : Galais A et Bennerot H., Eds Amélioration variétale des espèces cultivées, Paris, France INRA 379-391.pp.
- [23] **Gilbaut., T. (2006)**, « Lycopène peut être. Tomate sans aucun doute!, Equation Nutrition »n°55.
- [24] **FAO stat. (2013)**, Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- [25] **Yousfi.M, (2018)**, Développement de la technologie agro-alimentaire dans la région de touat, cas de la conserverie de tomate de Reggane, Master de l'Université Africaine Ahmes Draia Adrar.
- [26] **Bedad.A, Bouhadja. M, Hamdi. H. (2018)**, Essai de formulation d'un jus de tomate, Master de l'Université 08 Mai 1945 Guelma.

Chapitre II :
Aspects Technologiques et
Approche Rhéologiques

II.1. Introduction

La transformation industrielle de la tomate, et plus particulièrement la fabrication du concentré, repose sur une série d'opérations unitaires précises visant à garantir la qualité, la sécurité et la stabilité du produit fini. Chaque étape du procédé, de la réception des tomates jusqu'à la concentration finale, obéit à des exigences technologiques strictes, tant sur le plan hygiénique que sur celui du rendement. Dans ce chapitre, nous aborderons les principaux aspects technologiques de ce processus, en mettant l'accent sur les techniques de manipulation, de traitement thermique, de concentration et de conditionnement. Parallèlement, une attention particulière sera accordée à l'approche rhéologique, essentielle pour comprendre le comportement du concentré de tomate.

II.2. Procédé technologique de fabrication du concentré de tomate**II.2.1. Présentation de l'unité de stage**

Le Groupe Ben Amor, fondé en 1984 en tant que société à responsabilité limitée à caractère familial, est aujourd'hui une entreprise étatique spécialisée dans le secteur agroalimentaire. Cette évolution vers une gestion publique reflète l'importance stratégique de ce groupe dans l'économie locale et nationale.

Le groupe dispose de deux unités de transformation situées dans la wilaya de Guelma. La première se trouve dans la commune de Bouati Mahmoud, à environ 19 km de Guelma, tandis que la seconde est localisée dans la zone industrielle d'El Fedjoudj, à seulement 5 km de la ville. Ces unités sont équipées pour assurer une transformation efficace des matières premières agricoles en produits alimentaires finis, répondant aux normes de qualité et de sécurité exigées dans l'industrie [1].

Grâce à l'intégration de pratiques technologiques modernes et à une organisation rigoureuse, le Groupe Ben Amor joue un rôle clé dans le développement de la filière agroalimentaire de la région, tout en contribuant à la valorisation des ressources locales.

II.2.2. Étapes technologiques de transformation de la concentré de tomate**II.2.2.1. Récolte**

La récolte des tomates se déroule généralement entre juillet et août, période durant laquelle les fruits atteignent leur pleine maturité. Les tomates, cueillies à la main pour garantir leur intégrité, sont soigneusement placées dans des caisses ou des billots afin d'éviter tout dommage. Cette méthode manuelle permet de préserver la qualité des fruits, essentielle pour une commercialisation optimale. Des pratiques appropriées de récolte contribuent également à

prolonger la durée de conservation des tomates, un facteur crucial pour répondre à la demande du marché [2].

II.2.2.2. Réception et lavage

À l'arrivée à l'usine, les tomates fraîches doivent faire l'objet d'un contrôle rigoureux. Pour cela, plusieurs points clés sont examinés :

- Uniformité de la couleur ;
- Séparation des fruits trop mûrs ou insuffisamment mûrs ;
- Vérification de la présence de terre ou de matières étrangères ;
- Élimination des fruits de variétés de tomates non destinées à la transformation [3].

Les tomates livrées dans des camions sont déchargées par injection d'eau à l'aide de tuyaux mobiles, qui les dirigent vers des piscines de stockage remplies d'eau. Ce procédé permet d'éliminer efficacement la poussière et les feuilles accumulées lors de la récolte.

L'eau utilisée pour ce lavage doit être potable et chaude afin de prévenir l'accumulation de micro-organismes et de garantir la sécurité alimentaire [3]. En effet, les tomates fraîches subissent trois étapes de lavage :

- **Déchargement et lavage 1** : Premier nettoyage pour éliminer les contaminants visibles.
- **Transport et lavage 2** : Lavage supplémentaire lors du transport vers la zone de triage.
- **Lavage final** : Effectué après l'opération de triage pour garantir la propreté avant la transformation.

Les deux figures suivantes illustrent la réception des tomates par camion ainsi que le processus de lavage.



Figure II. 1: Réception de la tomate.



Figure II. 2: Lavage de la tomate.

II.2.2.3. Triage

Les tomates lavées sont transportées vers la chaîne de triage, où les fruits pourris ou endommagés sont retirés manuellement. Au cours de cette opération, le lavage se poursuit sur chaque ligne grâce à un rinçage en continu (pulvérisation sous pression) de l'ensemble du système de transport, à l'aide de rampes glissantes [4]. La figure II.3 ci-dessous illustre le processus de triage des tomates.



Figure II. 3: Triage de la tomate.

II.2.2.4. Broyage

Après triage, les tomates sont déchiquetées et broyées avant de subir un préchauffage. En général, ces légumes sont entraînés par une vis sans fin vers les broyeurs de chaque chaîne où se fait le malaxage. Le produit broyé est collecté dans des cuves équipées d'une pompe de refoulement vers l'étape de préchauffage [4].



Figure II. 4: Broyeur.

II.2.2.5. Préchauffage

Le préchauffage du produit est assuré par de la vapeur provenant de la chaudière, à une température comprise entre 80 et 85 °C. À ce stade, le produit broyé est acheminé vers des cuiseurs en acier inoxydable, généralement constitués d'échangeurs de chaleur modulaires à faisceaux tubulaires ou d'équipements équivalents [4]. Cette étape a pour objectif d'assouplir la matière végétale afin de faciliter la séparation des graines et des peaux de la pulpe. Elle constitue ainsi une préparation essentielle avant l'opération de raffinage, permettant d'optimiser le rendement et la qualité du produit final.



Figure II. 5: Préchauffeur.

II.2.2.6. Passoire

Cette étape a pour objectif d'éliminer les épluchures et autres résidus solides, permettant ainsi de purifier le produit en séparant la pulpe des éléments indésirables [4].

II.2.2.7. Extraction et raffinage

Le produit broyé est acheminé vers des extracteurs centrifuges à axe vertical, où il est soumis à une séparation mécanique. Sous l'effet de la force centrifuge, le jus est extrait et dirigé par pompage vers les évaporateurs pour la concentration. En parallèle, les sous-produits solides

tels que les pellicules, les graines et autres résidus sont évacués au moyen d'une vis sans fin vers un réservoir de collecte, en vue d'un éventuel traitement ou d'une valorisation [4].

II.2.2.8. Concentration

Le jus raffiné contient encore un excès d'eau qu'il faut éliminer afin d'obtenir un produit à une concentration comprise entre 28 % et 30 %. Le principe de cette opération est basé sur l'évaporation en continu de la fraction d'eau libre présente dans le jus, par élévation de la température, avec élimination de la vapeur ainsi formée [4].

Pour le concentré de tomate, on peut avoir :

- ♦ Une simple concentration SCT : Brix < 22%
- ♦ Une double concentration, la plus commercialisée DCT : Brix entre 28% et 30%
- ♦ Une triple concentration TCT : Brix entre 34% et 36%

La triple concentration permet de conserver de grandes quantités de tomates dans des boîtes de taille réduite. On peut ensuite obtenir une double concentration par dilution. Notons que la concentration constitue le nœud du processus de transformation [5].

La figure II.6 illustre le procédé de concentration sous vide, incluant la bulle de cuisson, l'évaporateur, ainsi que le réfractomètre utilisé pour mesurer la concentration en extrait sec.



bulle de cuisson



Évaporateurs



Réfractomètre

Figure II. 6: Concentration sous vide.

II.2.2.9. Pasteurisation

La pasteurisation est une étape préparatoire avant la stérilisation. Le produit est porté à une température de 90 à 95 °C (traitement thermique). Elle permet la destruction de tous les

germes pathogènes ainsi que l'élimination de la population microbienne pouvant être présente dans le produit concentré [4].

Elle se déroule en trois phases :

- Une phase chaude, où la température atteint environ 95 °C pendant 6 minutes.
- Une phase tiède, avec une température stationnaire d'environ 60 °C.
- Une phase froide, correspondant à une douche d'eau froide à 20 °C.

La figure II.7 présente le système de pasteurisation utilisé pour assurer ces différentes phases de traitement thermique.



Figure II. 7: Système de pasteurisation.

II.2.2.10. Remplissage et sertissage

Le concentré pasteurisé est soumis aux opérations de dosage, de remplissage, puis de sertissage dans des boîtes métalliques [4].

La figure II.8 illustre l'appareil de dosage utilisé pour assurer un remplissage précis du concentré avant sertissage.



Figure II. 8: Doseuse.

II.2.2.11. Stérilisation des boîtes

La stérilisation des boîtes remplies de concentré de tomate s'effectue dans des autoclaves contenant de l'eau chaude, à une température comprise entre 90 et 95 °C. Cette étape permet la destruction de tous les micro-organismes susceptibles d'être présents à l'intérieur des boîtes,

assurant ainsi la stabilité microbiologique du produit pendant le stockage ^[4]. La figure II.9 présente le stérilisateur utilisé dans ce procédé. La durée de stérilisation varie en fonction du volume des boîtes : plus le contenant est grand, plus le temps de traitement thermique est long afin de garantir une stérilisation complète à cœur (Tableau II.1).

Tableau II. 1: Durée de stérilisation en fonction de volume ^[6].

Volume des boîtes	La durée de stérilisation
1/6 Kg	30 min
1/2 Kg	50 min
1 Kg	80 min
5 Kg	120 min



Figure II. 9: Stérilisateur.

II.2.2.12. Refroidissement

Les boîtes stérilisées sont refroidies à l'aide d'eau, ce qui permet de diminuer rapidement la température des contenants après le processus de stérilisation ^[4].

II.2.2.13. Séchage et conditionnement

Les boîtes refroidies sont séchées à l'air libre afin d'éliminer les gouttelettes d'eau, puis elles sont transmises à travers une bande transporteuse vers la section de conditionnement. Après emballage, les cartons sont stockés sur des palettes pour être commercialisés^[4].



Figure II. 10: Séchoirs.

Le processus complet de fabrication du concentré de tomate est illustré dans la figure suivante :

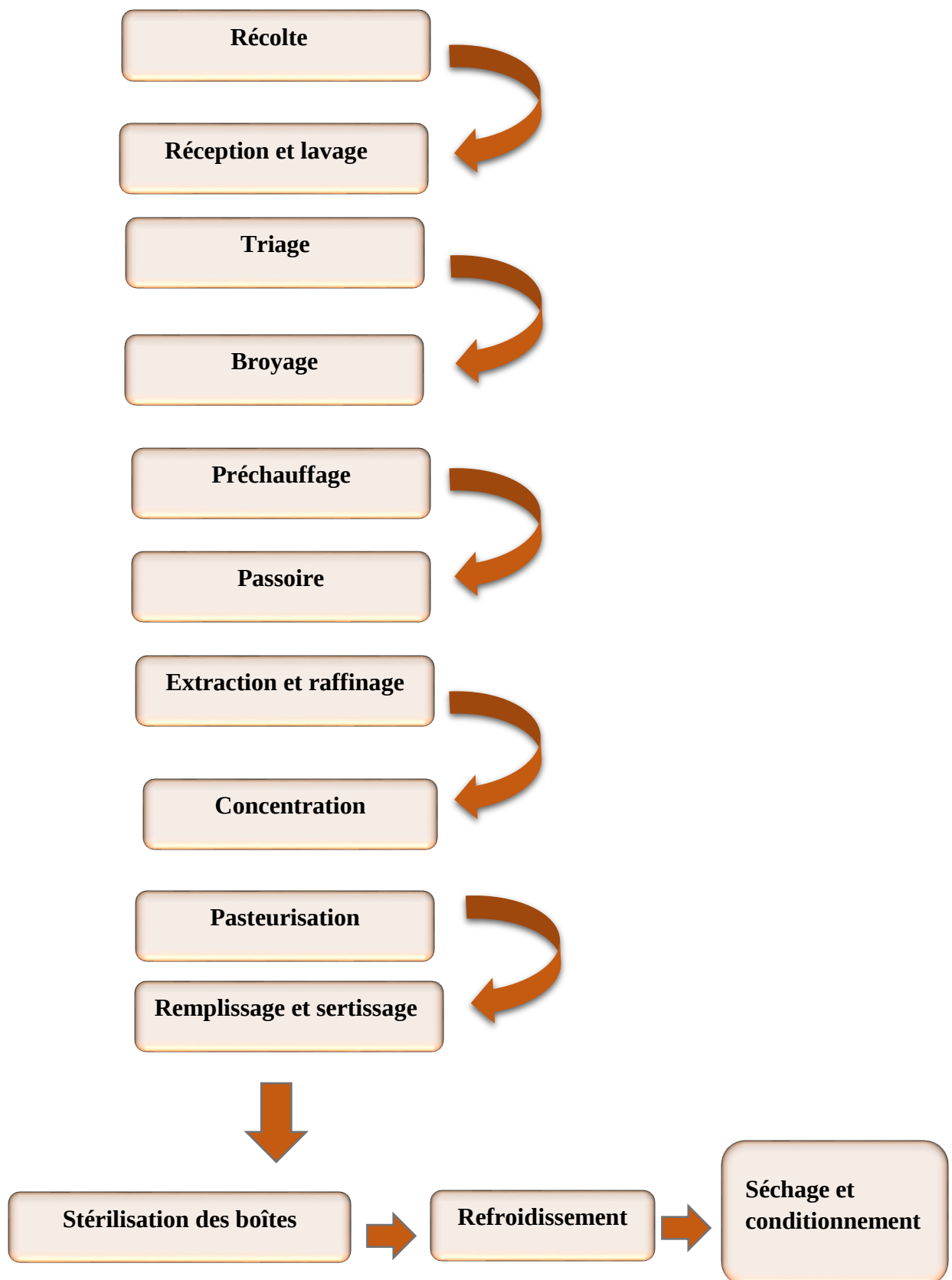


Figure II. 11: Processus de fabrication de concentré de tomate.

II.3. Approche rhéologique

II.3.1. La rhéologie

La rhéologie est un mot créé aux états unis en 1928 par Eugène Cook Bingham (1878-1945), c'est une branche de la physique qui étudie l'écoulement, les déformations des corps, et plus généralement de la viscosité des matériaux sous l'action de contraintes qui leurs sont appliquées compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps. C'est l'étude du comportement mécanique, c'est à dire les relations entre les contraintes et les déformations.

II.3.2. Rhéomètre

Les rhéomètres sont des appareils où lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces (coaxiales, plan/plan ou cône/plan) solides l'une au repos et l'autre mobile. Ils appliquent un cisaillement à l'échantillon. Généralement de faibles dimensions caractéristiques (très faible inertie mécanique du rotor), ils permettent d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée [7].

II.3.2.1. Domaine d'application du rhéomètre

Les rhéomètres sont surtout utilisés en recherche et développement, par exemple en formulation d'adhésifs, d'huiles, de bitumes, de peintures, de cosmétiques, ou pour le suivi de réticulation d'une résine thermodurcissable (mesure de la viscosité minimale, du temps de gel...). Les rhéomètres peuvent être classés en trois catégories :

- Les rhéomètres à régime permanent : utilisés comme viscosimètres, ils permettent néanmoins d'obtenir des rhéogrammes pour des liquides.
- Les rhéomètres à régime transitoire permettent l'étude de la viscoélasticité des matériaux.
- Les rhéomètres dynamiques qui fonctionnent en régime sinusoïdal forcé sont sûrement ceux qui fournissent le plus de renseignements des matériaux [8].

II.3.3. Définition et lois générales

II.3.3.1. Viscosité

La viscosité (η) peut être définie comme étant la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique représente la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue [9].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

L'unité de la viscosité est Pa.s

II.3.3.2. Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement (τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Entre les deux surfaces solides, on peut considérer la matière comme un empilement de couches susceptibles de glisser les unes par rapport aux autres sous l'action du cisaillement, faisant apparaître des contraintes entre chaque couche. On parle de contrainte de cisaillement τ « shear-stress » (1), quotient de la force F appliquée à la plaque supérieure et de l'aire sous la plaque A voir (Figure II. 12).

$$\text{Où } \tau = \frac{F}{S} \quad (2)$$

τ : Contrainte ; Force par unité de surface, elle s'exprime en N.m^{-2} ou bien en Pascal (Pa).

S : la surface élémentaire de l'entité considérée en m^2 .

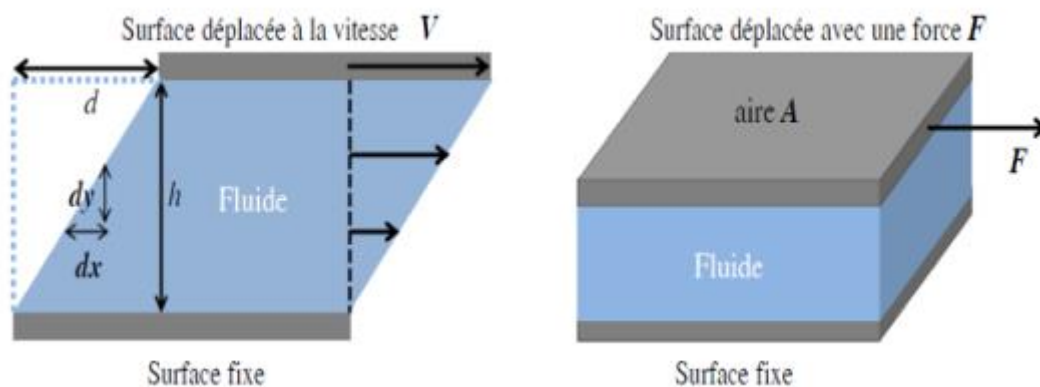


Figure II.12: Cisaillement dans le cas du modèle à deux plaques ^[10].

II.3.3.3. Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. Autrement dit c'est le rapport de la différence de vitesse entre deux lames et la distance qui les sépare.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (3)$$

γ : la déformation de cisaillement (sans unité), t : temps(s)

$$\gamma = \frac{dx}{dy} \quad (4)$$

La valeur de taux de cisaillement dépend, non seulement de la vitesse de déplacement de la plaque mobile mais aussi, de l'épaisseur e cisailée. Si e est faible, il est possible d'atteindre des vitesses de cisaillement élevés même avec des vitesses v relativement faibles ^[11].

II.3.4. Mesures oscillatoires

Les mesures oscillatoires permettent d'obtenir des informations sur la capacité du matériau à stocker de l'énergie élastique à travers le module élastique G' et sur son caractère dissipatif à l'aide du module visqueux G'' . Elles consistent à faire osciller les géométries avec une amplitude de déformation et une fréquence choisie [12].

Cette mesure permet de déterminer les propriétés viscoélastiques d'un matériau (module de conservation G' et de perte G'') en appliquant à l'échantillon une déformation sinusoïdale de pulsation (en rad. s-1), et de fréquence f .

- **Le module de conservation (G')** : représente la composante élastique en cisaillement et représente la portion réversible de la déformation suite à une sollicitation. Cet élément est représenté par le ressort dans la schématisation de la viscoélasticité (unité Pa)
- **Le module de perte (G'')** : représente la composante visqueuse en cisaillement de la solution et constitue la portion irréversible de la déformation suite à une sollicitation (Unité Pa).

II.3.5. Comportements rhéologiques des fluides

On distingue les fluides newtoniens, les fluides non newtoniens indépendants ou dépendants du temps et les fluides viscoélastiques.

- **Fluides newtoniens** : Un fluide est dit *newtonien* (ou fluide parfait) lorsque sa viscosité (η) est constante, quel que soit le gradient de vitesse, à température et pression fixées. Sa viscosité est indépendante du temps ; on parle alors de viscosité absolue. Dans ce cas, la contrainte de cisaillement varie linéairement avec le taux de cisaillement [13].

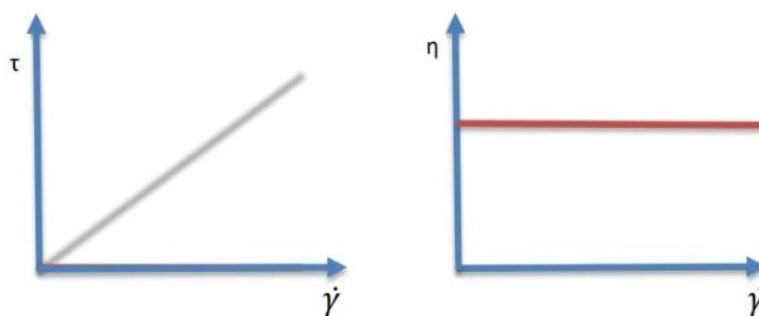


Figure II.13: Rhéogrammes des fluides newtoniens.

- **Fluide non newtonien** : Un fluide est qualifié de *non newtonien* lorsque sa courbe d'écoulement est non linéaire. Cela signifie que sa viscosité n'est pas constante, mais dépend des conditions d'écoulement, notamment du taux de cisaillement, et parfois

même de l'histoire du fluide. Dans ce cas, la contrainte de cisaillement ne suit pas une relation linéaire avec la vitesse de cisaillement voir la figure II.14 ^[14].

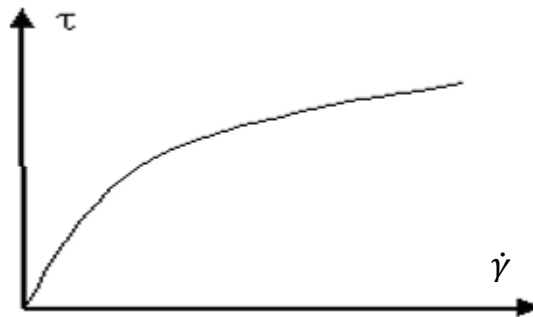


Figure II. 14: Rhéogramme des fluides non newtoniens.

II.4. Conclusion

La production du concentré de tomate repose sur une maîtrise rigoureuse des différentes opérations unitaires, allant de la réception des matières premières jusqu'au conditionnement final. Chaque étape du processus de transformation joue un rôle crucial dans la préservation des caractéristiques organoleptiques, nutritionnelles et fonctionnelles du produit. Le respect des bonnes pratiques de fabrication, des normes d'hygiène strictes et des protocoles de contrôle qualité permet de garantir un concentré stable, sûr et conforme aux exigences du marché. De plus, l'analyse rhéologique constitue un outil complémentaire essentiel au contrôle qualité, permettant d'optimiser les paramètres de transformation et d'assurer la constance des performances du produit fini.

Référence bibliographiques

- [1] Site web : https://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_Benamor (consulté le 12/03/2025).
- [2] Site web : « <https://www.scapcb.com/fabrication> », (consulté le 27/03/2025).
- [3] **Ghebbi K,(2016)**, « Influence de fertilisation potassique sur le comportement et les aptitudes technologiques de deux variétés de tomates industrielles(*lycopersicon esculentum* mil) ». Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciences agronomiques. école nationale supérieure agronomique - EL Harrach –Alger .pp10-68,183p .
- [4] **Degui D,(2016)**, « Section analyses et essais comparatifs ».Article 6, La transformation de la tomate. 4 p.
- [5] **Yousfi M,(2018)**, «Développement de la technologie agro-alimentaire dans la région de Touat , Cas de la conserverie de tomate de Reggane». mémoire en vue de l'obtention de master académique , Université Africaine Ahmed Draia, Adrar.
- [6] **Sadok D , Zedak S, (2016)**,« Etude de qualité physico-chimique et microbiologique de la conserve du concentré de tomate(TALLOISE) ». Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.
- [7] Site web: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rh%C3%A9om%C3%A8tre>.(Consulté le 07/04/2025).
- [8] Siteweb: <http://Patrick.Kohl.Pagesperso-Orange.Fr/Rheologie/Rheo>. (Consulté le 07/04/2025).
- [9] **G. Courraze ; J. L. Rossiord (1991)**, « Initiation à la rhéologie » Tech et doc.
- [10] **Mezger T. G, (2006)**, « The Rheology Handbook », 2nd Edition, Vincentz Network,
- [11] **Tixier N, (2003)**, « Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées », Thèse de doctorat, l'université de Limoge.
- [12] **Boudrahem N, (2012)**, « Analyse du comportement hydrodynamique global de particules fluidisées par un fluide non-newtonien », Mémoire de magister de l'Université A. Mira (Bejaia).
- [13] **Barnes H,(1997)**, « thixotropy- A review, Journal of Non-Newtonian », Fluid Mechanic, V: 70, Issues (1-2), pp: 1- 33, 199.

- [14] **Bekkour K, (1991)**, « Caractérisation rhéologique et en écoulement d'émulsion d'huile de vaseline et d'eau et d'émulsion chargé en solide », Thèse de doctorat à l'université de louis Pasteur Strasbourg.

Chapitre III :
Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Le laboratoire joue un rôle fondamental dans le suivi de la qualité du produit tout au long du processus de fabrication. Il constitue un élément essentiel de l'unité de production, assurant une surveillance constante à chaque étape.

Dans le cadre de la phase expérimentale de notre étude, les analyses physico-chimiques ont été réalisées au sein du laboratoire central du Groupe CAB, tandis que les investigations rhéologiques ont été effectuées dans le laboratoire d'analyses industrielles et de génie des matériaux (LAIGM) de l'Université de Guelma.

Ce chapitre a pour objectif de décrire les différentes méthodes analytiques et techniques de caractérisation appliquées au cours de l'ensemble de nos travaux expérimentaux.

III.2. Echantillonnage

L'étude a porté sur le double concentré de tomate (DCT), conditionné en boîtes métalliques de 400 g de poids net. Trois échantillons de conserves de tomate ont été sélectionnés pour les analyses : CAB, Hello et ZAHRA. Ces échantillons représentent différentes marques commercialisées par la conserverie Amor Benamor.



Figure III. 1: Echantillons analysés.

III.3. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques sont essentielles pour évaluer la qualité des produits agroalimentaires, notamment des conserves de tomate. Elles permettent de vérifier le respect

des normes de sécurité, d'assurer la stabilité du produit au cours de sa conservation, et de garantir une qualité constante pour le consommateur.

Dans ce cadre, plusieurs paramètres ont été mesurés conformément aux normes AFNOR ou algériennes : le poids, la température, le Brix, le pH, la couleur, la consistance et l'acidité.

III.3.1. Contrôle du poids

La quantité de produit conditionné ne doit pas être inférieure à un seuil minimal spécifié. La vérification de cette conformité s'effectue par la mesure du poids net, qui permet de s'assurer que le remplissage a été réalisé correctement.

Cette mesure est effectuée sur le produit fini à l'aide d'une balance, préalablement tarée à l'aide d'une boîte vide.

♦ Mode opératoire :

- Préparer deux boîtes : l'une vide, l'autre remplie de tomate.
- Placer la boîte vide sur la balance et effectuer la tare.
- Remplacer la boîte vide par la boîte remplie afin de mesurer directement le poids net du contenu.

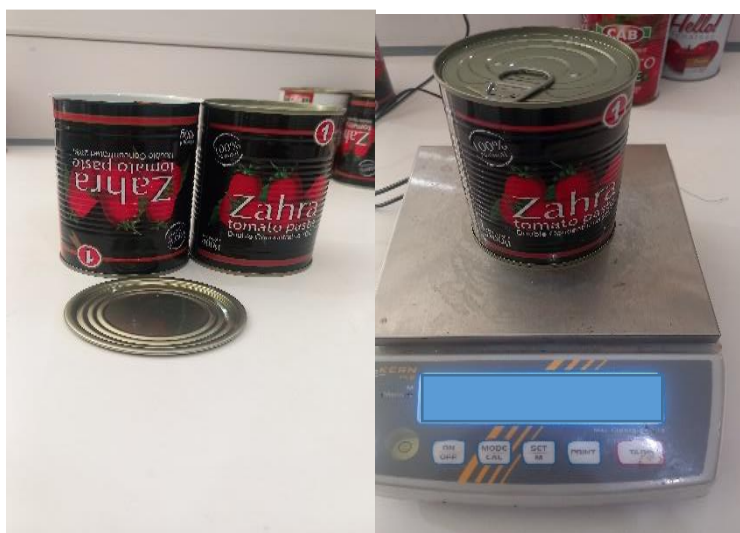


Figure III. 2: Mesure du poids.

III.3.2. Contrôle du pH

Le potentiel hydrogène (pH) est un indicateur fondamental de l'acidité ou de l'alcalinité d'un produit. Il revêt une importance à la fois physico-chimique et microbiologique, notamment dans le domaine des conserves alimentaires d'origine végétale, où une classification officielle repose sur ce paramètre [1]. Le pH varie sur une échelle de 0 à 14, la neutralité correspondant à une valeur de 7. Une valeur inférieure à 7 indique un milieu acide, tandis qu'une valeur supérieure traduit un caractère alcalin [2].

♦ Mode opératoire :

- Vérifier que l'appareil est propre et qu'il a été correctement calibré à l'aide de solutions tampons (pH 7,00 et pH 4,01).
- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée, puis la sécher délicatement à l'aide d'un papier absorbant non abrasif.
- Plonger l'électrode dans l'échantillon de tomate et attendre que la lecture se stabilise.
- Noter la valeur affichée sur l'écran.
- Rincer à nouveau l'électrode avec de l'eau distillée après usage.

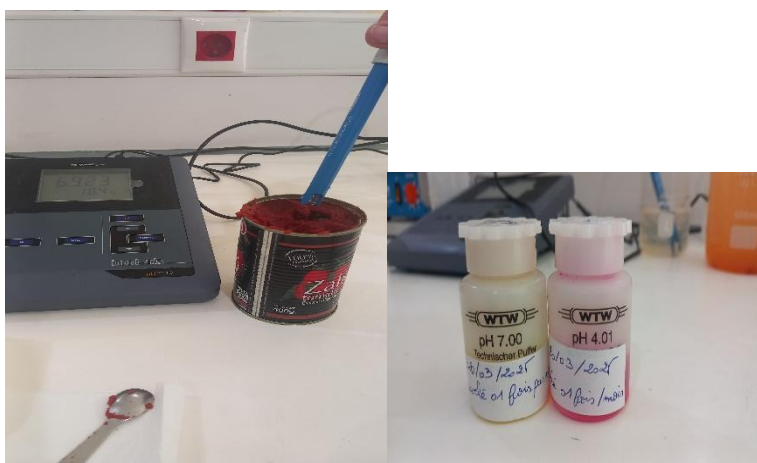


Figure III. 3: Mesure du pH.

III.3.3. Contrôle de la température

La température est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité du produit fini et vérifier le respect des conditions de conservation ou de traitement thermique.

♦ Mode opératoire :

- Ouvrir la boîte de tomates et bien mélanger le contenu afin d'obtenir un échantillon homogène.
- Produit Introduire la sonde du thermomètre au centre de l'échantillon.
- Attendre la stabilisation de la valeur puis noter la température indiquée.



Figure III. 4: Mesure de la température.

III.3.4. Contrôle du Brix

L'échelle Brix permet de mesurer le pourcentage de matière sèche soluble dans un liquide, principalement le saccharose. Plus la valeur du Brix est élevée, plus l'échantillon est riche en sucres solubles. Cette mesure est particulièrement utile pour évaluer la concentration en solides dissous dans la purée de tomate. L'instrument utilisé pour cette analyse est le réfractomètre [3].

♦ Mode opératoire :

- Prélever une petite quantité de purée de tomate dans un bécher et homogénéiser à l'aide d'une spatule.
- Étalonner le réfractomètre à l'aide de l'eau distillée.
- Déposer quelques gouttes de purée de tomate sur la surface de lecture du réfractomètre.
- Refermer la plaque, attendre environ 10 secondes, puis lire la valeur du Brix affichée.
- Répéter la mesure trois fois pour garantir la précision des résultats.
- Nettoyer soigneusement la surface de lecture avec de l'eau distillée après chaque mesure.



Figure III. 5: Détermination du Brix par réfractomètre.

III.3.5. Contrôle de la couleur

L'analyse de la couleur des tomates est réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre (Figure III. 6). Ce dernier fonctionne selon le principe du colorimètre, où l'ensemble des couleurs peut être représenté dans un espace colorimétrique à trois dimensions. Chaque couleur est définie par trois paramètres indépendants [4] :

- L'indice de luminance (L)
- L'indice de rouge (a)
- L'indice de jaune (b)

Un rapport recommandé par les normes est également utilisé : **a/b**, qui permet d'évaluer la proportion de pigments rouges par rapport aux pigments jaunes.

♦ Mode opératoire

- Pour faire la mesure de la couleur, ajuster la valeur de Brix des échantillons de tomate concentrée à 12,5 %.

Pour cela, préparer une solution mère de DCT à 12,5 % de Brix :

- Peser 80 g de l'échantillon de tomate concentrée.
- Déterminer la quantité d'eau distillée à ajouter en utilisant la formule suivante :

$$\text{quantité d'eau ajoutée} = \frac{\text{quantité de tomate concentré} \times \text{Brix mesuré}}{12,5} - \text{quantité de tomate}$$

- Allumer le spectrophotomètre.
- Étalonner l'appareil avec des standards appropriés.
- Remplir la cuve en verre jusqu'à 2/3 de son volume avec la solution préparée.
- Placer la cuve sur la plateforme du spectrophotomètre et la recouvrir avec un couvercle opaque.
- Cliquer sur le bouton « ALLER » pour commencer la mesure.



Figure III.6: Détermination de la couleur par spectrophotomètre.

- Enregistrer les résultats de la couleur :
 - **a** : teneur de tomate en pigment rouge.
 - **b** : teneur de tomate en pigment jaune
 - **a/b** : rapport des pigments rouges aux pigments jaunes
 - **L** : luminosité de la tomate

III.3.6. Contrôle de la consistance

L'analyse de la consistance du concentré de tomate (DCT) est essentielle pour évaluer la texture et la fluidité du produit. À cet effet, un consistomètre Bostwick est utilisé. Le produit à analyser doit présenter un degré Brix de 12,5 %.

Le consistomètre Bostwick est un dispositif en acier inoxydable composé d'un couloir de 24 cm de long, gradué tous les 0,5 cm. Ce couloir est fermé à une extrémité par une porte à guillotine, qui retient le produit jusqu'au début de la mesure. La consistance est déterminée en libérant l'échantillon dans le couloir d'écoulement, puis en mesurant la distance parcourue par le concentré après 30 secondes. Les résultats sont exprimés en centimètres Bostwick, conformément à une méthode normalisée [5].

♦ Mode opératoire

- Diluer une quantité appropriée de concentré de tomate avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un Brix de 12,5 %.
- Fermer la porte du compartiment du consistomètre.
- Verser l'échantillon dans le compartiment, puis éliminer l'excès à l'aide d'une spatule.

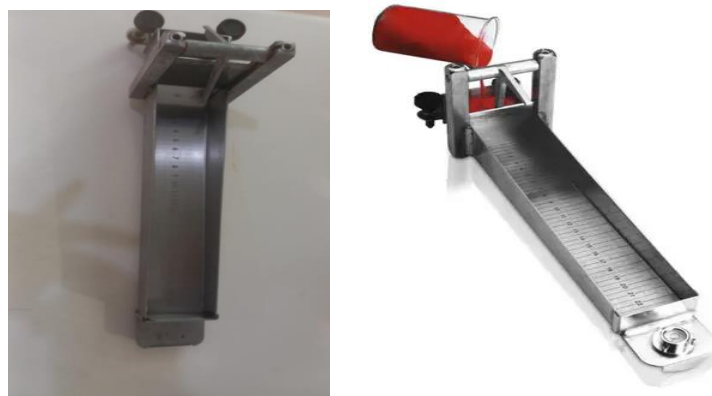


Figure III.7: Mesure de la consistance par le consistomètre de Bostwick.

- Ouvrir la porte et démarrer simultanément le chronomètre pour une durée de 30 secondes.
- Mesurer et noter la distance parcourue par l'échantillon au bout de ce temps. Les valeurs sont exprimées en centimètres Bostwick.
- Nettoyer soigneusement l'appareil et le sécher avant une nouvelle utilisation.

III.3.7. Contrôle de l'acidité

L'objectif de ce contrôle est de déterminer la quantité d'acides présents dans les produits à analyser. Le dosage est effectué par titration avec une base forte (NaOH à 0,1 M). La concentration des acides dans les aliments, tels que les acides acétique, citrique, lactique et malique, est déterminée en titrant une prise d'essai d'hydroxyde de sodium jusqu'à atteindre un pH de 8,10. L'acide prédominant dans la tomate est l'acide citrique monohydrate.

♦ Mode opératoire

- Peser environ 10 g de l'échantillon dans un bécher.
- Ajouter une quantité appropriée d'eau distillée.
- Agiter le mélange jusqu'à obtenir une solution homogène.
- Transférer le mélange dans une fiole jaugée de 250 ml à l'aide d'un entonnoir.
- Compléter la fiole avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume total de 250 ml.
- Mettre la fiole sous agitation pour assurer un mélange homogène.
- Filtrer le mélange pour éliminer les particules solides.
- Prélever 50 ml du filtrat à l'aide d'une pipette et le verser dans un bécher.
- Dans une éprouvette, diluer le filtrat avec 300 ml d'eau distillée et agiter le mélange.
- Effectuer la titration avec la solution de soude (NaOH) jusqu'à atteindre un pH de 8,10 à l'aide d'un pH-mètre.
- Noter le volume de soude versé.

Calcul de l'acidité

La quantité d'acide dans l'échantillon est déterminée par la formule suivante :

$$\text{acidité} = \frac{V \times 1400}{\text{Brix} \times 50}$$

Où V est le volume de soude versé



Figure III.8: Filtration et titration par NaOH.

III.3.8. Test de stabilité

Les échantillons de concentré de tomate sont conservés dans le laboratoire après chaque production. Pendant cette période de conservation, il est possible d'observer les modifications des boîtes ainsi que l'état de leur contenu. Si la boîte n'est pas rouillée, cela indique que le contenu est en bon état.

Pour contrôler les caractéristiques du concentré de tomate, il est essentiel de vérifier les éléments suivants :

- La couleur
- L'acidité
- La consistance et la texture
- Le taux d'impureté
- La saveur et l'arôme
- La teneur en sucres, vitamines et minéraux

Le test de stabilité est réalisé à trois températures : température ambiante, 32 °C et 55 °C.

♦ Mode opératoire

- Prendre 6 boîtes de concentré de tomate :
 - 2 boîtes serviront de témoins à température ambiante pendant 21 jours.
 - 2 boîtes seront incubées dans une étuve à 32 °C pendant 21 jours.
 - 2 boîtes seront incubées dans une étuve à 55 °C pendant 7 jours.

- Après 7 jours, mesurer le pH des 2 boîtes incubées à 55 °C.
- Après 21 jours, mesurer le pH des 2 boîtes témoins et des 2 boîtes incubées à 32 °C.
- Calculer la différence entre le pH des boîtes témoins et des boîtes à 32 °C, puis entre le pH des boîtes témoins et des boîtes à 55 °C.
- La variation de pH doit être inférieure à 0,5 pour indiquer que le produit est stable.

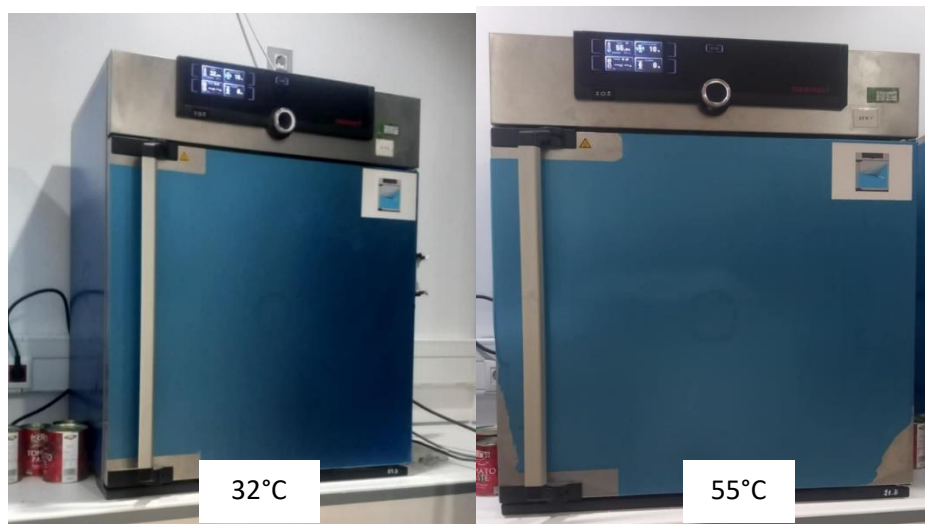


Figure III.9: Contrôle de stabilité (Etuve de 32°C et 55°C).

III.4. Analyses rhéologiques

La caractérisation rhéologique des produits à base de tomate vise à évaluer leurs propriétés de fluidité et de déformation sous l'effet de contraintes mécaniques, notamment la viscosité et les modules de stockage G' et de perte G'' . Ces analyses sont réalisées au laboratoire LAIGM à l'aide d'un rhéomètre de type Bohlin CVO, qui est un outil essentiel pour obtenir des données précises sur le comportement rhéologique des produits transformés à base de tomate.

III.4.1. Dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux utilisés pour effectuer les analyses rhéologiques voir la figure III.10 comprennent les éléments suivants :

➤ Rhéomètre Bohlin CVO

Le rhéomètre Bohlin CVO (Continuous Shear Viscosity Oscillation) est un instrument sophistiqué, conçu pour évaluer les propriétés rhéologiques des produits à base de tomate, tels que les sauces, les purées et les concentrés. Cet appareil est particulièrement adapté à l'analyse des matériaux viscoélastiques, permettant d'étudier leur comportement sous différentes conditions de sollicitation.

Le principe de fonctionnement du rhéomètre repose sur l'analyse de la réponse du matériau à une sollicitation oscillatoire, dans un système de cisaillement continu. Lors de l'essai, le produit

à base de tomate est placé entre deux plaques parallèles, qui effectuent un mouvement oscillatoire, générant ainsi un cisaillement constant au sein de l'échantillon. Cette méthode permet de mesurer des paramètres essentiels tels que la viscosité dynamique, le module de cisaillement (ou module d'élasticité) ainsi que l'amortissement du matériau.

L'un des avantages du rhéomètre Bohlin CVO est sa capacité à mesurer les propriétés rhéologiques d'un produit sur une large gamme de fréquences, fournissant ainsi des informations détaillées sur le comportement du produit à différents taux de cisaillement. Cela est particulièrement pertinent pour les produits à base de tomate, qui peuvent présenter des variations significatives de texture et de consistance en fonction de leur formulation et des conditions de traitement.

➤ **Compresseur**

Un dispositif électrique utilisé pour comprimer l'air et maintenir les conditions nécessaires aux essais.

➤ **Régulateur de température (unité de chaleur Peltier)**

Cet instrument permet de contrôler avec précision la température des échantillons durant les analyses, garantissant des résultats fiables.

➤ **Logiciel de contrôle**

Un programme informatique qui facilite la programmation et le suivi des paramètres d'essai (comme la déformation, le temps, la fréquence, etc.), ainsi que la sauvegarde et le traitement des données obtenues lors des mesures.



Figure III.10: Dispositif expérimentale de l'étude rhéologique.

III.4.2. Principe de fonctionnement du rhéomètre

Le rhéomètre Bohlin CVO est un appareil de mesure rotatif capable d'évaluer les propriétés rhéologiques des matériaux. Il permet d'obtenir des gradients de vitesse compris entre $0,0716$ et 5012 s^{-1} grâce à la géométrie cône-plan utilisée pour les essais.

➤ **Spécifications techniques du rhéomètre :**

- **Déformation** : de $1,432 \cdot 10^{-5}$ à $1,432 \cdot 10^{10}$.
- **Contrainte** : de $0,02984$ à 5968 Pa
- **Fréquence d'oscillation** : de $7,5 \cdot 10^{-7}$ à 628 Hz
- **Contrôle de la température** : de -180 °C à 550 °C

◆ **Mode opératoire**

- Avant la mesure, préparer l'échantillon de manière appropriée, en fonction de sa nature. Par exemple, pour des gels ou des crèmes, il est nécessaire de bien homogénéiser l'échantillon pour obtenir une consistance uniforme.
- Placer l'échantillon entre deux plaques parallèles du rhéomètre Bohlin CVO. Il est important de veiller à ce que la quantité d'échantillon soit suffisante pour remplir l'espace entre les plaques, tout en évitant tout excès qui pourrait provoquer des fuites.
- Ajuster les paramètres de mesure, tels que la fréquence, l'amplitude et la température, en fonction des caractéristiques de l'échantillon et de la plage viscoélastique recherchée.
- Avant d'effectuer les mesures, Calibrer le rhéomètre avec une substance de référence dont les propriétés sont connues. Cette étape garantit que l'appareil fonctionne correctement et permet d'obtenir des résultats précis.
- Une fois l'échantillon monté et le rhéomètre calibré, les mesures peuvent commencer. Le rhéomètre procède à des évaluations de contrainte et de déformation pour chaque fréquence choisie, généralement de manière automatique, et enregistre les données.
- Les données recueillies peuvent être traitées à l'aide d'outils d'analyse pour déterminer diverses propriétés rhéologiques, telles que le module de cisaillement, la viscosité dynamique et la déformation.
- Après les mesures, il est crucial de nettoyer et sécher soigneusement le rhéomètre et ses accessoires afin d'éviter toute contamination lors des futures analyses.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a détaillé les modes opératoires pour les analyses physico-chimiques et rhéologiques mises en œuvre dans le cadre de notre étude. Chaque méthode a été soigneusement décrite, en précisant les équipements utilisés, les protocoles expérimentaux suivis, ainsi que les conditions spécifiques requises pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

Référence bibliographiques

- [1] **Jora, (1997)**, « Arrêté interministériel du 24 août 1997 relatif aux conserves de purée de tomate », journal officiel de la République Algérienne n°77 :pp26.
- [2] Site web : «https://www.oieau.fr/RFEA/fiches/AnalyseEau/Physico_chimie_PresG en.pdf », (Consulté le 12/03/2025).
- [3] Site web: «https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Echelle_de_brix », (consulté le 16/03/2025).
- [4] **Moévi I, (2006)**, « Le point sur la couleur de la viande bovine », NTERBEV : 149, rue de Bercy-75595 Paris, 113p.
- [5] **Codex Stan 13, (1981)**, « Norme pour les tomates en conserve, norme alimentaire internationales », adopté en 1981, Révisée en 2007, Amendée en 2013, 2017.8P.

Chapitre IV :
Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse qualitative de trois échantillons de double concentré de tomate, provenant de différentes marques commerciales : Zahra, Hello et CAB.

Dans un premier temps, nous présentons les résultats des analyses physico-chimiques effectuées en laboratoire, portant sur des paramètres de qualité essentiels tels que le poids, le pH, la teneur en matière sèche soluble (°Brix), l'acidité, la couleur, la consistance et la stabilité. Ces critères permettent d'évaluer la conformité des produits par rapport aux exigences réglementaires et des attentes industrielles.

Ensuite, nous exposons les résultats des analyses rhéologiques réalisées au niveau du laboratoire LAIGM, visant à caractériser le comportement viscoélastique des trois échantillons. Ces essais, effectués sous différentes conditions de cisaillement et de déformation, permettent de mieux comprendre la réponse mécanique des produits, essentielle pour leur transformation industrielle, leur conditionnement.

IV.2. Résultats des analyses physico-chimiques

L'analyse physico-chimique a été réalisée sur trois échantillons différents de concentré de tomate, correspondant aux variétés commerciales ZAHRA, CAB et HELLO. Les paramètres évalués sont les suivants : le poids, le potentiel hydrogène (pH), le degré Brix, la couleur, la consistance et l'acidité.

IV.2.1. Déterminations du poids net

Le poids net de trois échantillons de chaque variété de double concentré de tomate (DCT), conditionnés en boîtes de 400 g, est mesuré afin de vérifier la conformité entre l'étiquetage et le contenu réel du produit fini.

Tableau IV. 1: Résultats des mesures de poids des trois échantillons.

Les échantillons	ZAHRA			CAB			HELLO		
	Ech1	Ech2	Ech3	Ech1	Ech2	Ech3	Ech1	Ech2	Ech3
Le poids brut (g)	453,9	453,8	453,6	454	454,1	454	454,3	454,4	454,2
Le poids d'emballage (g)	52,8			52,5			52,2		
Le poids net (g)	401,1	401	400,8	401,5	401,6	401,5	402,1	402,2	402

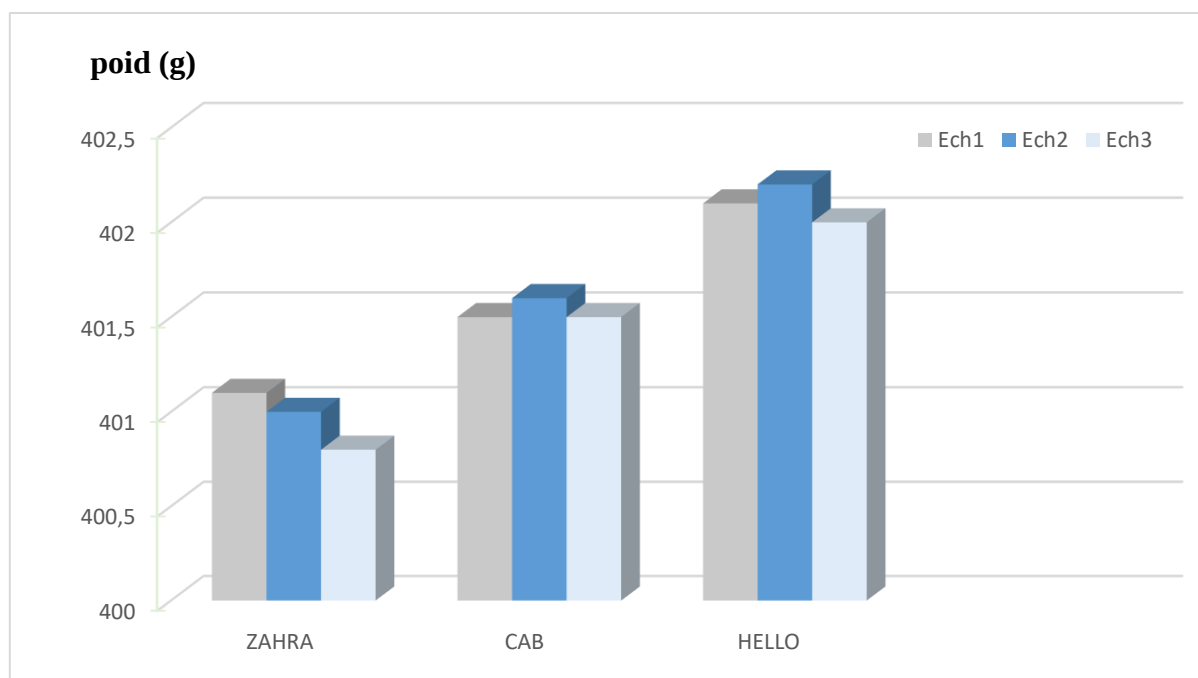


Figure IV. 1: Histogramme des poids des trois échantillons analysés.

D'après les résultats obtenus, la pesée des trois échantillons analysés pour chacun des trois produits (ZAHRA, CAB, HELLO) est conforme, ce qui reflète un processus de production stable en termes de poids.

IV.2.2.Détermination du pH

Le pH constitue un facteur essentiel pour évaluer la qualité physico-chimique et organoleptique des produits à base de tomate. Les résultats présentés ci-dessous indiquent les valeurs de pH mesurées pour les trois échantillons analysés :

Tableau IV. 2: Résultats du pH des trois échantillons

Echantillon	pH			Norme (IANOR)
	Ech1	Ech2	Ech3	
ZAHRA	4,26	4,27	4,25	≤ 4,50
CAB	4,38	4,36	4,39	
HELLO	4,30	4,30	4,31	

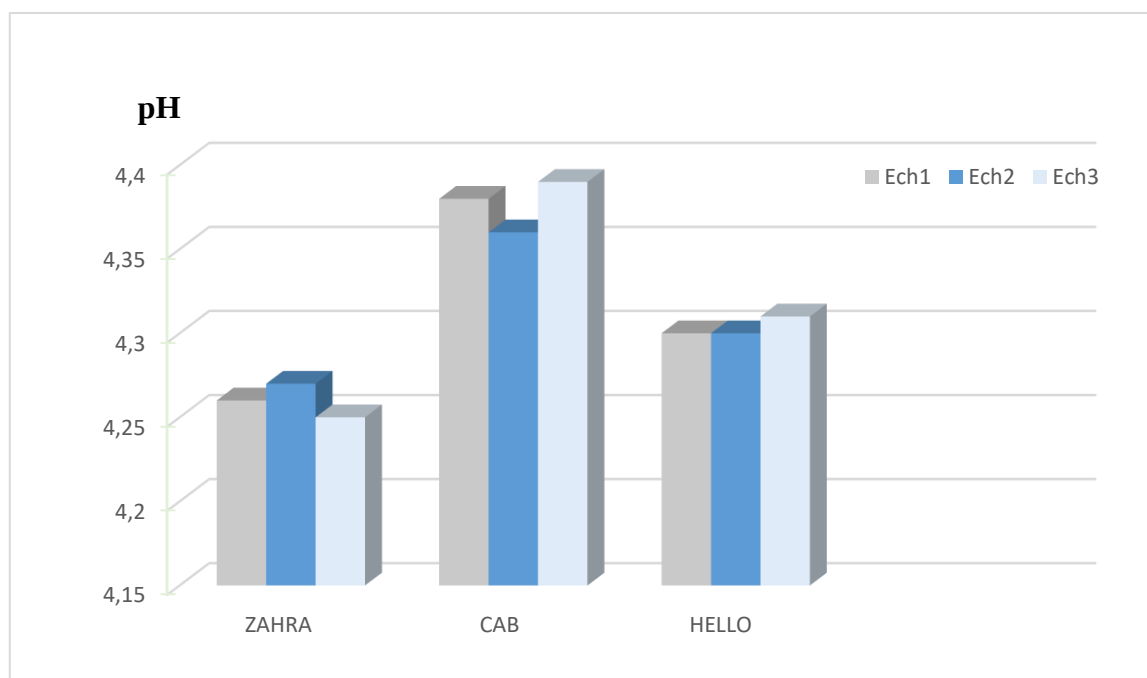


Figure IV.2 :Histogramme du pH des trois échantillons analysés.

Nous observons que, les résultats de pH de trois échantillons de concentré de tomate pour les trois produits situent dans l'intervalle [4,26 ; 4,39]. Ces valeurs sont tout à fait normales et conformes aux normes, qui exigent un pH inférieur à 4,50.

IV.2.3.Détermination du Brix

Le Brix est l'un des paramètres essentiels dans l'analyse physico-chimique de la tomate en conserve, car il indique le pourcentage de matière soluble, principalement constituée de sucres naturels présents dans le jus de tomate.

Les résultats du Brix exprimés en pourcentage (%), sont présentés ci-dessous :

Tableau IV. 3: Résultats du Brix des trois échantillons.

Echantillon	Brix (%)			Norme (%)
	Ech1	Ech2	Ech3	
ZAHRA	28,75	28,70	28,69	28
CAB	28,31	28,35	28,32	
HELLO	28,64	28,60	28,63	

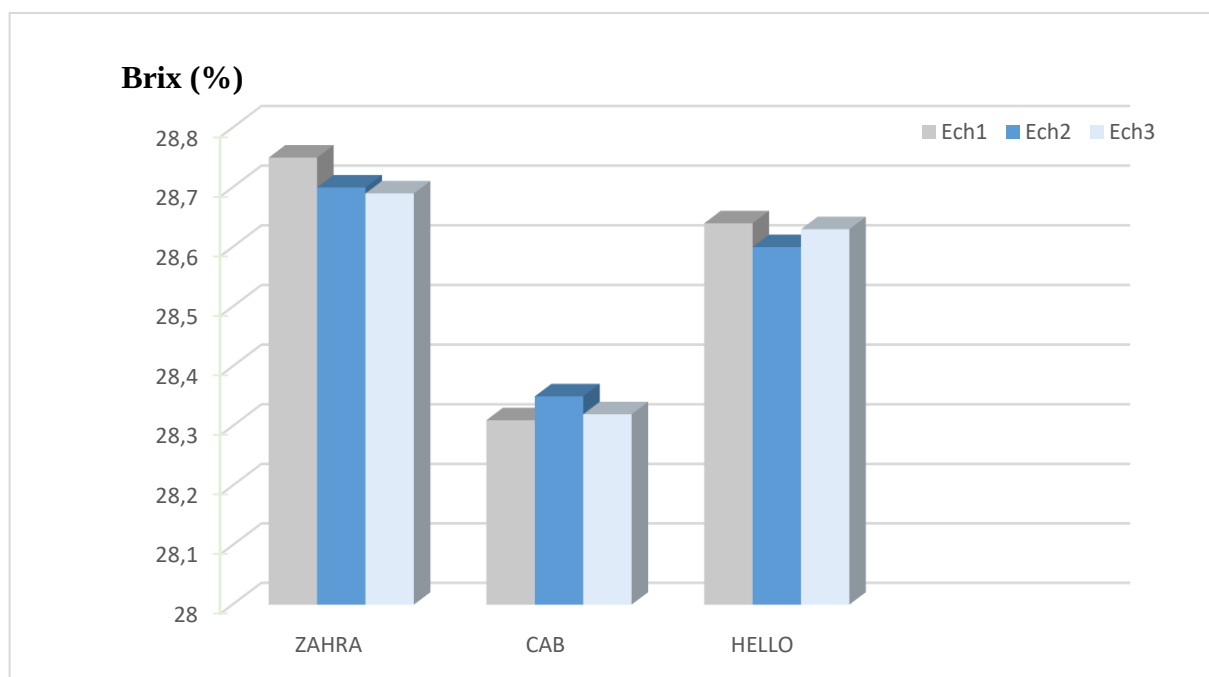


Figure IV.3: Histogramme du Brix des trois échantillons analysés.

D'après les résultats obtenus, les valeurs de Brix des trois échantillons analysés pour chaque produit présentent une très faible variabilité, ce qui indique une bonne homogénéité au sein de chaque lot. De plus, les trois échantillons présentent un taux de Brix conforme aux normes, c'est-à-dire proche de 28 %.

IV.2.4.Détermination de la couleur

La couleur des trois échantillons du produit final a été exprimée à travers le rapport a/b, qui représente la proportion de rouge par rapport à la proportion de jaune.

La quantité de concentré de tomate et d'eau nécessaire pour réduire le Brix à 12,5 % est présentée dans le tableau IV.4.

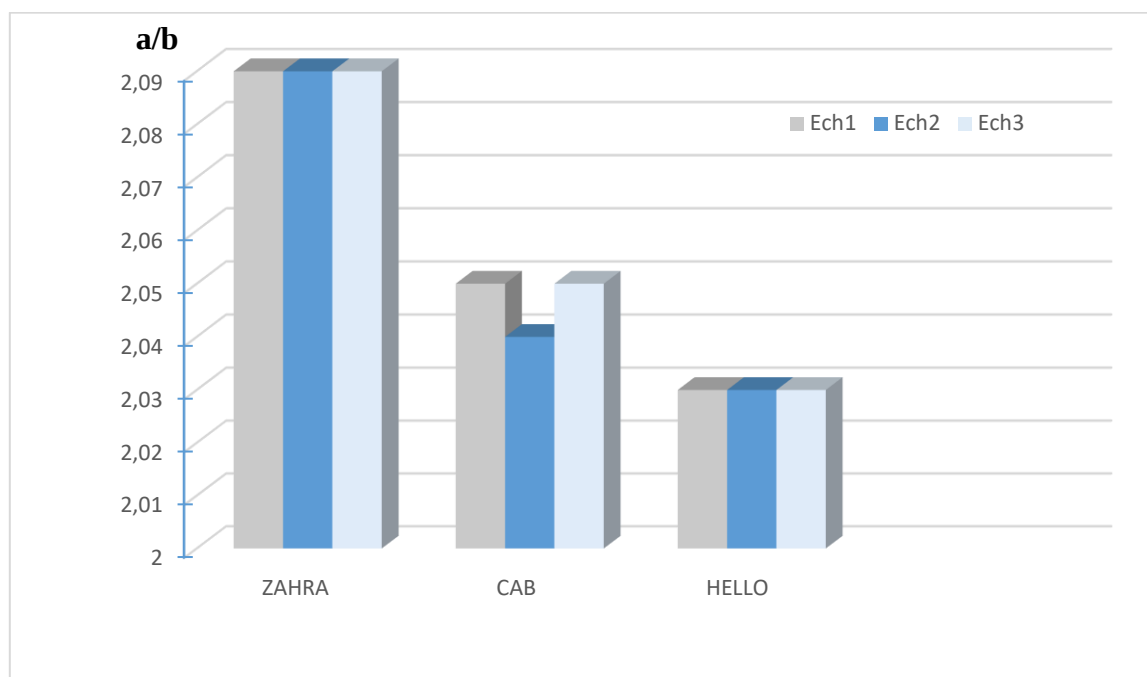
Tableau IV. 4 : Quantité de DCT et H₂O.

Echantillon	Le Brix (%)			Quantité de DCT(g)			Quantité de H ₂ O (ml)		
	Ech1	Ech2	Ech3	Ech1	Ech2	Ech3	Ech1	Ech2	Ech3
ZAHRA	28,75	28,70	28,69	80,8	80,8	80,8	105,04	104,71	104,65
CAB	28,31	28,35	28,32	80,4	80,4	80,4	101,68	101,94	101,75
HELLO	28,64	28,60	28,63	80,8	80,8	80,8	104,32	104,07	104,26

Les résultats de la couleur des trois échantillons analysés sont représentés dans le tableau IV.5.

Tableau IV. 5 : Résultats des mesures de couleur des trois échantillons.

Echantillon	La couleur		
	Ech1	Ech2	Ech3
ZAHRA	a : 27,13 b : 12,99 a/b : 2,09 L : 26,78	a : 27,14 b : 12,99 a/b : 2,09 L : 26,79	a : 27,13 b : 12,99 a/b : 2,09 L : 26,78
CAB	a : 26,58 b : 12,96 a/b : 2,05 L : 26,78	a : 26,59 b : 12,99 a/b : 2,04 L : 26,78	a : 26,57 b : 12,96 a/b : 2,05 L : 26,77
HELLO	a : 26,20 b : 12,91 a/b : 2,03 L : 26,87	a : 26,19 b : 12,90 a/b : 2,03 L : 26,88	a : 26,21 b : 12,91 a/b : 2,03 L : 26,88

**Figure IV.4: Histogramme de la couleur des trois échantillons analysés.**

La valeur du rapport de chromaticité (a/b) permet de contrôler la qualité du produit, car plus ce rapport est élevé, plus la couleur rouge est intense, ce qui est un indicateur de fraîcheur

et de bonne qualité. D'après les résultats obtenus, le rapport (a/b) des trois échantillons de chaque produit fini est conforme à la norme algérienne.

IV.2.5. Détermination de la consistance

La consistance est un facteur technologique crucial, directement lié à la teneur en substances insolubles dans l'alcool, telles que les protéines, pectines et polysaccharides^[1].

Les résultats de la consistance des trois échantillons analysés sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV. 6 : Résultats de la consistance des trois échantillons.

Echantillons	ZAHRA			CAB			HELLO		
	Ech1	Ech2	Ech3	Ech1	Ech2	Ech3	Ech1	Ech2	Ech3
La consistance (cm/s)	6,2	6,2	6,3	5,9	5,9	5,8	6	6,1	6

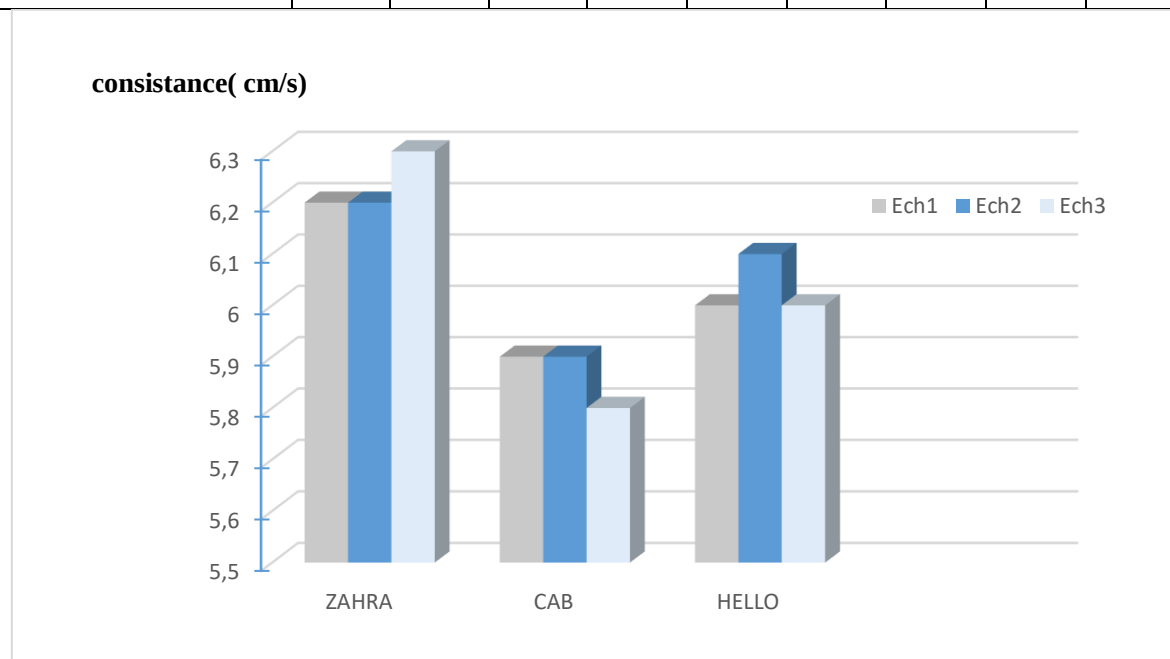


Figure IV.5: Histogramme de la consistance des trois échantillons analysés.

À partir de ces résultats, toutes les valeurs des échantillons analysés sont relativement proches et acceptables, se situant entre 5,8 et 6,3 cm/s.

IV.2.6. Détermination de l'acidité

Cette analyse a pour objectif d'estimer la quantité d'acide naturel présente dans le produit en réalisant un dosage basique à l'aide d'hydroxydes de sodium (NaOH).

L'acidité totale est un facteur déterminant pour évaluer la qualité gustative du concentré de tomate.

L'acidité est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Acidité} = \frac{V_{NaOH} \times 1400}{\text{Brix} \times 50}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 7 : Résultats de l'acidité des trois échantillons.

Echantillons	L'acidité			Norme
	Ech1	Ech2	Ech3	
ZAHRA	5,74	5,75	5,74	< 7
CAB	5,93	5,92	6	
HELLO	4,49	4,50	4,49	

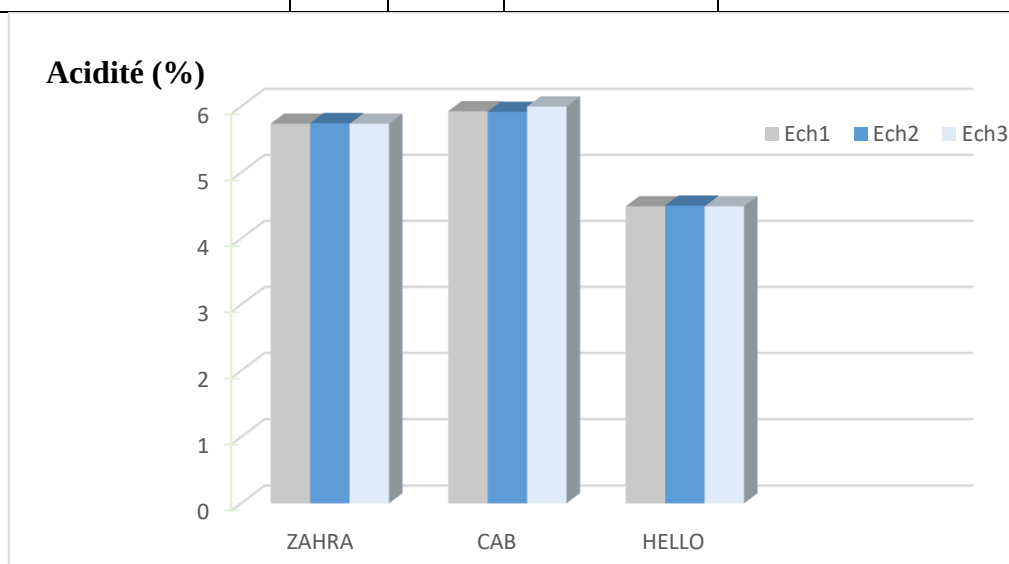


Figure IV.6: Histogramme de l'acidité des trois échantillons analysés.

On remarque que les résultats obtenus pour les trois échantillons analysés de chacun des trois produits varient entre 4,49 et 6. Ces valeurs ne dépassant pas 7, tous les échantillons restent conformes aux normes algériennes.

Les échantillons de la marque HELLO montrent une teneur en acidité légèrement inférieure à celle des autres échantillons, ce qui peut être attribué au stade de maturation et aux variétés de tomates utilisées lors de la transformation.

IV.2.7. Test de stabilité

Les conserves de concentré de tomate sont considérées comme stables, si elles ne montrent pas de signes de détérioration, tels que :

- Des altérations de l'apparence de l'emballage ou du produit après traitement thermique, comme une odeur désagréable, un gonflement ou de petites fuites.

- Des variations de pH par rapport au témoin qui ne dépassent pas 0,5 unité.
- Des changements dans la flore microbienne, tant sur le plan quantitatif que qualitatif.
- Après 21 jours, les boîtes placées dans l'étuve sont comparées aux témoins :

Tableau IV. 8 : Résultats de test de stabilité pour ZAHRA.

	Témoin 1 à 25°C	Témoin 2 à 25°C	Boîte 1 à 32°C	Boîte 2 à 32°C	Boîte 1 à 55°C	Boîte 2 à 55°C
Flochage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Fuitage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Bombage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Modification d'odeur et de couleur	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
pH	4,26	4,25	4,22	4,21	4,21	4,20
Variation de pH	pH témoin – pH (boîte à 32°C) : 4,26 – 4,21 = 0,05 pH témoin – pH (boîte à 55°C) : 4,26 – 4,20 = 0,06					Norme < 0,5

Tableau IV. 9 : Résultats de test de stabilité pour CAB.

	Témoin 1 à 25°C	Témoin 2 à 25°C	Boîte 1 à 32°C	Boîte 2 à 32°C	Boîte 1 à 55°C	Boîte 2 à 55°C
Flochage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Fuitage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Bombage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Modification d'odeur et de couleur	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
pH	4,38	4,37	4,36	4,35	4,34	4,33
Variation de pH	pH témoin – pH (boîte à 32°C) : 4,38 – 4,35 = 0,03 pH témoin – pH (boîte à 55°C) : 4,38 – 4,33 = 0,05					Norme < 0,5

Tableau IV.10 : Résultats de test de stabilité pour HELLO.

	Témoin 1 à 25°C	Témoin 2 à 25°C	Boîte 1 à 32°C	Boîte 2 à 32°C	Boîte 1 à 55°C	Boîte 2 à 55°C
Flochage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Fuitage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Bombage	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
Modification d'odeur et de couleur	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
pH	4,30	4,28	4,28	4,29	4,30	4,27
Variation de pH	pH témoin – pH (boîte à 32°C) : $4,30 - 4,28 = 0,02$ pH témoin – pH (boîte à 55°C) : $4,30 - 4,27 = 0,03$					Norme < 0,5

- ◆ D'après les résultats présentés dans les tableaux ci-dessus, aucun changement d'odeur ni de couleur n'a été observé. De plus, aucun signe de fuitage, flochage ou bombage n'a été constaté pour les trois échantillons. Les variations de pH sont également restées inférieures à 0,5.

Ces observations permettent de conclure que le produit est stable, conforme aux exigences de conservation, et peut donc être commercialisé et consommé sans risque.

IV.3. Comportement rhéologique du concentré de tomate

Dans cette section, nous présentons une étude des propriétés rhéologiques du concentré de tomate, en tenant compte de deux régimes distincts : le régime permanent (ou stationnaire) et le régime oscillatoire. Cette analyse vise à caractériser le comportement d'écoulement du produit, essentiel pour le dimensionnement des équipements de transformation et l'optimisation des procédés industriels dans l'agroalimentaire.

IV.3.1. Régime permanent

Dans ce régime, l'étude s'appuie sur l'analyse des courbes d'écoulement, notamment l'évolution de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse (vitesse de cisaillement). Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $\dot{\gamma}$ variée entre $[0,07-30\text{s}^{-1}]$. Les résultats obtenus permettent de déterminer la nature du comportement rhéologique du produit.

L'analyse a été réalisée pour trois variétés de concentré de tomate : *Zahra*, *Hello* et *CAB*. Les résultats obtenus permettent de comparer les réponses mécaniques de ces échantillons face

à un cisaillement, et de mieux comprendre l'influence de la composition ou du procédé de fabrication sur leurs propriétés rhéologiques.

IV.3.1.1. Évolution de la contrainte

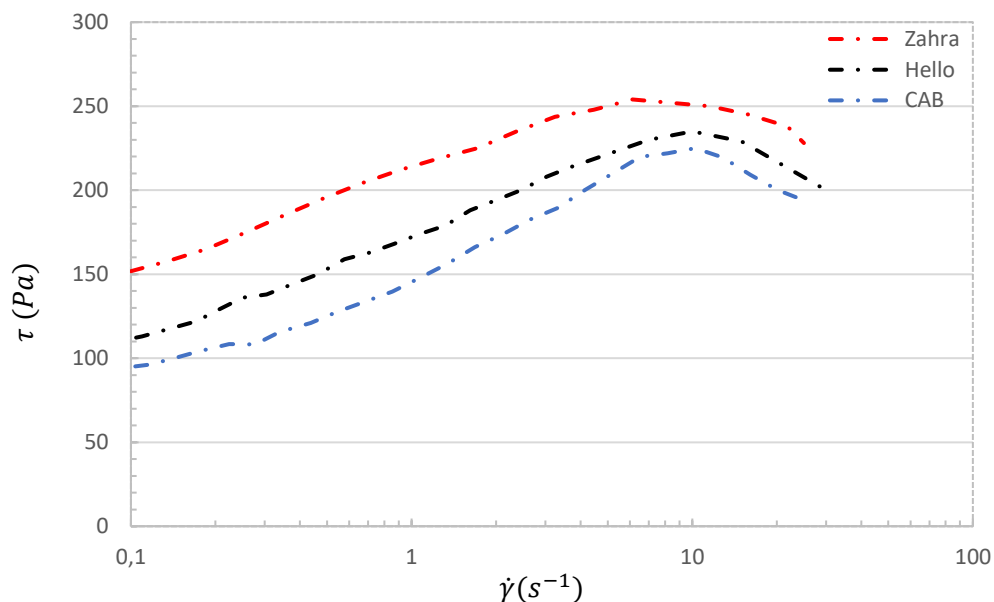


Figure IV.7 : Evolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement.

Ce rhéogramme, représentant la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement pour les trois échantillons de concentré de tomate (Zahra, Hello et CAB), présente une forme concave orientée vers le bas, caractéristique d'un comportement non newtonien de type pseudoplastique. Parmi les échantillons analysés, le concentré de tomate de la marque Zahra présente une contrainte de cisaillement légèrement plus élevée pour une même vitesse de cisaillement. Cela reflète une texture plus consistante et une résistance accrue à l'écoulement, probablement due à une teneur plus élevée en matières sèches, notamment en fibres, en pectines et en sucres.

IV.3.1.2. Évolution de la viscosité

Le rhéogramme ci-dessous (figure IV.8), représentant l'évolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement pour les trois variétés de concentré de tomate (Zahra, Hello et CAB), met en évidence une diminution progressive de la viscosité à mesure que la vitesse de cisaillement augmente.

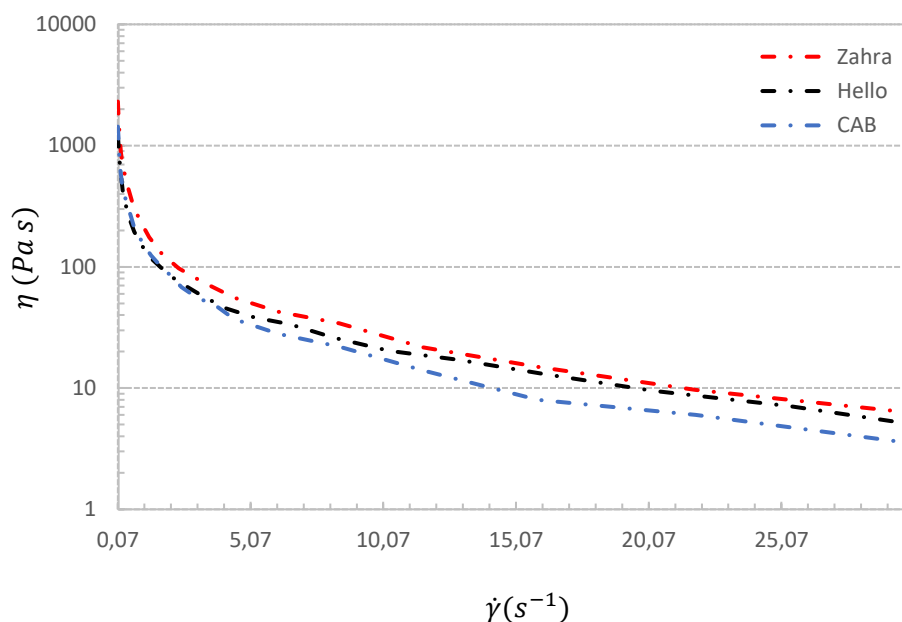


Figure IV.8: Evolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.

Ce comportement confirme les résultats précédents et traduit un comportement pseudoplastique (shear-thinning), caractérisé par une désorganisation des structures internes du produit sous l'effet du cisaillement. Cette désorganisation concerne notamment les réseaux de pectines, les interactions entre particules solides et la cohésion de la matrice colloïdale. Ces résultats sont en accord avec les travaux expérimentaux antérieurs ayant mis en évidence le comportement pseudoplastique des concentrés de tomate^[2,3].

Bien que les trois variétés présentent un comportement rhéologique similaire, la variété Zahra se distingue par une viscosité apparente légèrement plus élevée.

Ces variations rhéologiques entre les différentes marques peuvent être attribuées aux différences de formulation et à la maturité des tomates utilisées. La composition variable des lots (origine des matières premières, conditions de concentration, additifs éventuels) influence directement la structure colloïdale du concentré, en modifiant la cohésion de la matrice et la capacité du produit à résister à la déformation.

IV.3.2. Régime oscillatoire

L'étude du comportement viscoélastique de la concentrée de tomate a été réalisée à l'aide d'essais en rhéologie oscillatoire, qui permettent d'analyser simultanément les propriétés élastiques (solides) et visqueuses (fluide) du matériau. Deux paramètres fondamentaux ont été mesurés ^[4] :

- Le module de stockage (G'), aussi appelé module élastique, qui reflète la capacité du matériau à emmagasiner l'énergie mécanique lorsqu'il est soumis à une contrainte. Il traduit le comportement élastique.
- Le module de perte (G''), ou module visqueux, qui mesure la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur, illustrant le comportement visqueux du matériau.

➤ **Balayage en déformation**

Le test dynamique effectué correspond à un balayage en déformation (*strain sweep*), qui permet de déterminer la plage linéaire viscoélastique (LVE) d'un matériau. Dans cette plage, les modules de stockage (G') et de perte (G'') restent constants quelles que soient les valeurs de la déformation appliquée, ce qui signifie que la structure interne du matériau reste intacte.

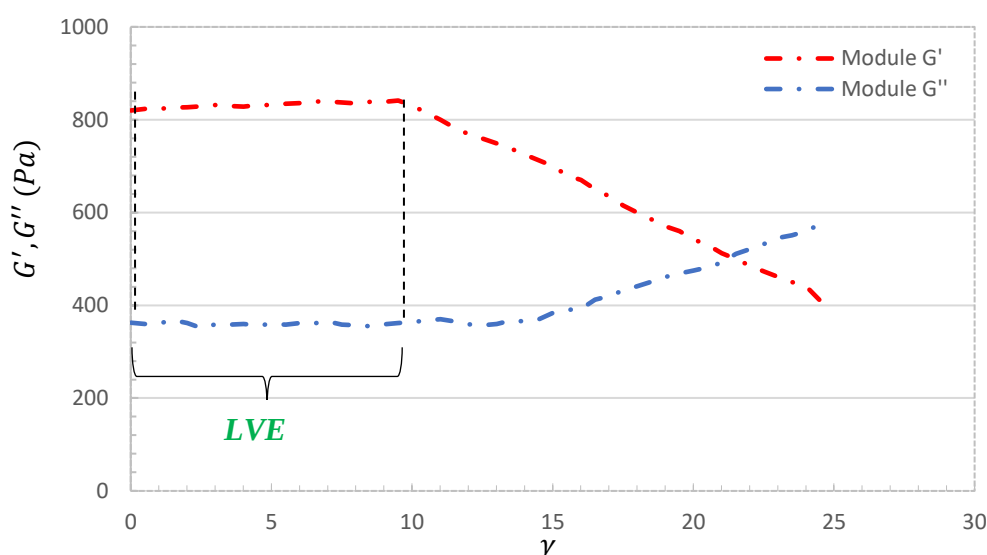


Figure IV.9: Les modules G' et G'' en fonction de la déformation.

Le rhéogramme IV.9 illustre la variation des modules G' et G'' en fonction de la déformation appliquée pour l'échantillon de concentré de tomate. On observe que dans l'intervalle de déformation compris entre 0,01 et 10, les deux modules demeurent pratiquement constants, traduisant une stabilité structurale du matériau. Dans cette zone, le module élastique G' est largement supérieur au module visqueux G'' , ce qui indique une prédominance du comportement solide (élastique).

Lorsque la déformation dépasse cette plage (au-delà de 10), on observe :

- une diminution progressive de G' , ce qui indique le début de la désorganisation de la structure interne (rupture des réseaux de pectines, relâchement des interactions entre particules solides...),
- une augmentation de G'' , traduisant un comportement de plus en plus visqueux.

À partir d'une déformation de 22, le module G'' devient supérieur à G' , ce qui marque une transition nette vers un comportement visqueux. Cette inversion entre G' et G'' est typique de la perte de la cohésion structurale, et indique que le produit commence à s'écouler comme un fluide.

Ce comportement est caractéristique des systèmes colloïdaux concentrés, comme les concentrés de tomate, où la structure tridimensionnelle peut résister au cisaillement jusqu'à un certain seuil, avant de céder.

Références bibliographiques

- [1] **Gallais, A., Bannerot, H, (1992),** « Amélioration des espèce végétales cultivées objectifs et critères de sélection ».Edition :INRA.p.p.379-391.
- [2] **Dak, M., Verma, R. C., & Jaaffrey, S. N. A. (2008),** « Rheological Properties of Tomato Concentrate. International Journal of Food Engineering », 4(7), Article 11.
- [3] **Katlijn R. N. Moelants & al, (2014),** «Rheology of Concentrated Tomato-Derived Suspensions: Effects of Particle Characteristics. Food and Bioprocess Technology», Volume 7, pages 248–264.
- [4] **Steffe, J. F, (1996),** « *Rheological Methods in Food Process Engineering* (2nd Ed.) ». Freeman Press.

Chapitre V :
Docking moléculaire

V.1. Introduction

Dans cette étude, nous avons déterminé les interactions responsables de l'activité inhibitrice de l'acide citrique et de l'acide ascorbique en tant qu'inhibiteurs naturels des enzymes polyphénoloxydase (PPO) et peroxydase (POD), impliquées dans l'oxydation des composés phénoliques dans le concentré de tomate. Cette analyse vise à comprendre les modes de reconnaissance de ces acides en tant que ligands, ainsi que leur interaction avec les sites actifs des enzymes ciblées.

L'objectif est d'analyser, au niveau moléculaire, les mécanismes d'inhibition de ces acides vis-à-vis de PPO et POD, en utilisant la technique de docking moléculaire, réalisée avec le logiciel AutoDock Vina. Une fois les complexes ligand-enzyme obtenus, les interactions sont étudiées afin de comparer les affinités de liaison et les activités inhibitrices respectives de chaque acide, et d'évaluer leur impact potentiel sur la qualité du concentré de tomate.

V.2. Docking moléculaire

Le terme « docking » (ou ancrage / amarrage) est une technique bio-informatique qui permet de prédire la structure d'un complexe formé à partir d'un récepteur et un ligand. Le récepteur, généralement une protéine, une enzyme, représente la cible biologique, tandis que le ligand soit une petite molécule soit une protéine (Figure V.1). Les caractéristiques générales des interactions ligand/récepteur résident en une complémentarité stérique, hydrophobe et polaire entre les deux structures et une conformation d'énergie favorable du ligand qui privilégie une bonne affinité de liaison ^[1].

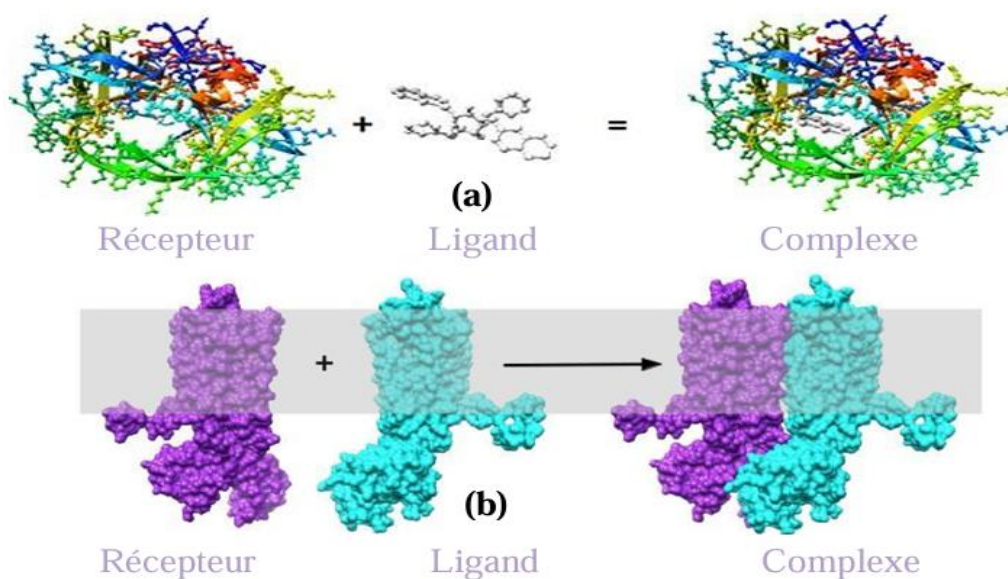


Figure V. 1: Illustration schématique du processus de docking.

V.2.1. Etapes de docking moléculaire

Une simulation de docking comprend essentiellement deux étapes : le docking proprement dit et le scoring (Figure V.2) [2].

- **Le docking** (première étape) est l'étape de sélection, consistant à placer le ligand dans le site actif de la protéine et à échantillonner les conformations, positions et orientations (poses) possibles, en ne retenant que celles représentant les modes d'interaction les plus favorables.
- **Le scoring** (deuxième étape) est l'étape de classement, qui consiste à évaluer l'affinité entre le ligand et la protéine, puis à attribuer un score aux poses obtenues lors de la phase de docking. Ce score permet de retenir la meilleure pose parmi toutes celles proposées.

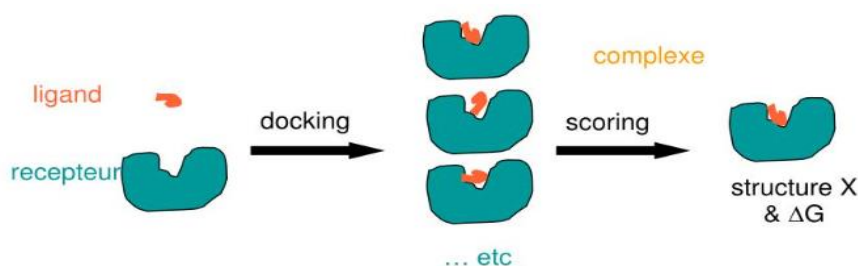


Figure V.2 : Représentation schématique des étapes du Docking moléculaire [3].

Les techniques de docking ont pour but de prédire la conformation et l'orientation d'une molécule lors de sa liaison à son récepteur ; ce qui permet de mieux comprendre la fonction biologique des complexes formés [4]. Cette approche *in silico* est considérablement plus facile à mettre en œuvre, moins cher et plus rapide que l'utilisation d'une méthode expérimentale, tout en évitant le test d'un plus grand nombre de molécules.

V.2.2. Démarche pratique du Docking

Détermination de la structure de la protéine ciblée

Les structures des protéines cibles proviennent principalement de la cristallographie aux rayons X et de la résonance magnétique nucléaire (RMN), selon les informations disponibles dans la base de données Protein Data Bank (PDB) [5].

Détermination du site actif

L'identification du site actif (ou site de liaison) constitue une étape cruciale dans les approches de docking moléculaire. Lorsque la structure du récepteur est Co-cristallisée avec un ligand, le site de liaison peut être directement exploité. En effet, un ligand cristallisé avec son récepteur fournit des indications précieuses sur l'emplacement du site actif ainsi que sur les acides aminés impliqués dans le mode de reconnaissance du ligand docké [5].

 Définition du grillage (Grid box)

Définir le volume dans lequel AutoDock Vina va rechercher les meilleures positions du ligand^[6].

V.2.3. Outils utilisés

Les programmes de docking moléculaires sont conçus pour prédire comment les deux entités chimiques interagissent et identifier le meilleur choix, permet ces programmes : l'AutoDock, Discovery studio, chemsketch et chemoffice.

- **Biovia Discovery Studio Visualizer** : Biovia Discovery Studio Visualizer est un logiciel gratuit de visualisation moléculaire et de modélisation 3D de haute qualité. Il permet aux scientifiques de visualiser en trois dimensions des structures moléculaires complexes, ainsi que de réaliser des analyses et des simulations de propriétés moléculaires. Le logiciel est capable de lire et de traiter plusieurs formats de fichiers de modèles moléculaires, notamment les fichiers PDB (Protein Data Bank), les fichiers MOL (Molfile) et les fichiers de trajectoires générés par des simulations de dynamique moléculaire ^[7].
- **AutoDock vina** : AutoDock Vina est un programme de docking dérivé d'AutoDock4. Son principal objectif est d'augmenter la vitesse d'exécution tout en maintenant, voire en améliorant, la qualité des résultats par rapport à AutoDock4. Ce gain de vitesse est obtenu grâce à l'implémentation du parallélisme dans l'algorithme, pour exploiter plusieurs processeurs de calcul simultanément (multi-core) ^[8].
- **Chemsketch** : C'est un outil complet conçu pour faciliter l'apprentissage de la chimie auprès des étudiants de tous niveaux. Il permet de dessiner des structures chimiques en 2D et en 3D, et offre de nombreuses fonctionnalités supplémentaires, telles que le calcul des propriétés moléculaires et la dénomination automatique des molécules ^[9].
- **Chemoffice**: est un logiciel très répandu en chimie pour la conception et la modélisation de molécules, en particulier de ligands ^[10].

V.2.4. Matériaux utilisés**V.2.4.1. Récepteur**

En Docking moléculaire, le récepteur est généralement une protéine spécialisée, capable de se lier de manière spécifique et réversible à une autre molécule appelée ligand, afin d'induire un effet biologique. La préparation du récepteur est une étape essentielle qui consiste à éliminer

les molécules d'eau et les ligands présents, à supprimer les chaînes non favorables, à ajouter les atomes d'hydrogène manquants, ainsi qu'à paramétrer les charges partielles.

Dans notre étude, nous avons choisi d'analyser deux enzymes oxydatives : la polyphénoloxydase (PPO) et la peroxydase (POD). Ces enzymes catalysent l'oxydation de composés phénoliques, entraînant un brunissement enzymatique ainsi qu'une altération de la couleur, du goût et de la valeur nutritive du concentré de tomate.

Le choix d'une structure PDB à partir de la base de données Protein Data Bank repose principalement sur des critères de qualité cristallographique, notamment la résolution et le facteur R (R-factor) [11]. Le tableau suivant présente les caractéristiques des structures utilisées, et la Figure ci-dessous illustre la structure obtenue à partir des fichiers PDB sélectionnés.

Tableau V.1 : Structures extraites de la base pdb.

Protéine	Code Pdb	Résolution (Å)	Facteur-R
Polyphénoloxydase (PPO)	6HQI	1.85	0.191
Peroxydase (POD)	4ATJ	2.50	0.162

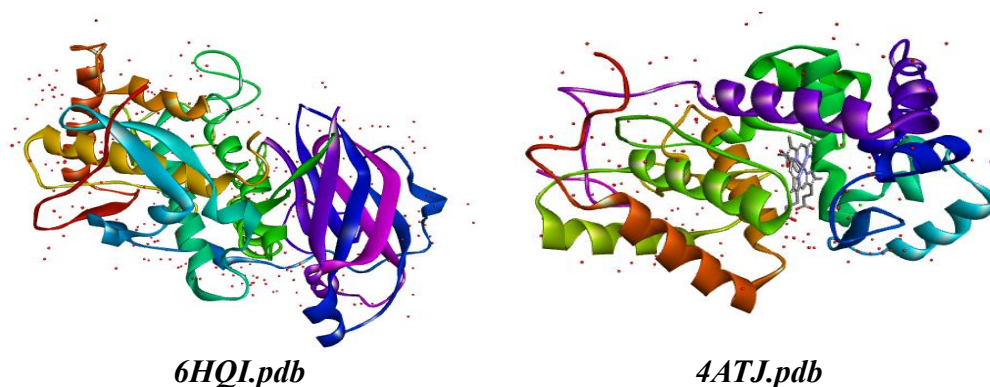


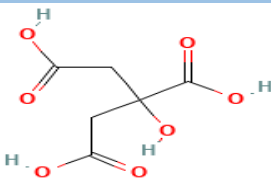
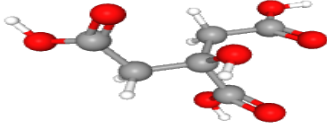
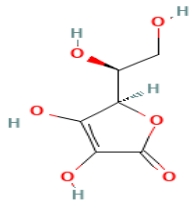
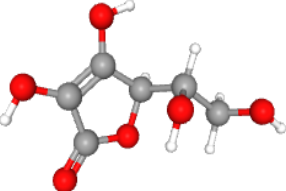
Figure V.3 : Structure du squelette polypeptidique de PPO et POD.

V.2.4.2. Ligand

Dans l'amarrage moléculaire, la sélection des ligands est une étape très importante. Doit être pertinent car la spécificité du site actif d'intérêt évite les tests moléculaires inutiles car le ligand permet d'améliorer ce changement conformationnel. Par conséquent, cette modification structurelle peut moduler son état fonctionnel et son activité [12].

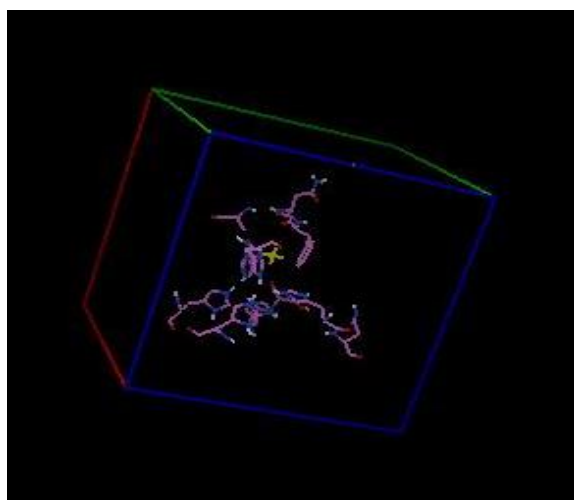
Dans notre étude, nous avons choisi deux ligands : l'acide citrique et l'acide ascorbique, dessinés à l'aide du logiciel ChemSketch. Le tableau ci-dessous présente les ligands étudiés ainsi que leurs structures.

Tableau V.2 : Représentation des ligands en 2D et 3D.

Ligand	Structure 2D	Structure 3D
Acide citrique		
Acide ascorbique		

V.3. Grid Box

En docking, le terme «Grid» désigne généralement une grille 3D représentant l'espace de recherche où les ligands sont placés dans le site actif d'une protéine cible afin d'évaluer leur affinité à différentes positions. Cette grille, centrée aux coordonnées (X, Y, Z), présente un volume égal à $25^3 \text{ \AA}^3$. L'espacement entre chaque point de la grille est de 1 Å (Figure V.4).

**Figure V.4 : Position de GRID BOX dans le site actif de polyphénoloxydase (PPO).**

V.4. Calcul de la RMSD

La Root Mean Square Deviation (RMSD), ou déviation quadratique moyenne, est un indicateur couramment utilisé pour évaluer la similarité structurale entre deux conformations moléculaires. Elle mesure la distance moyenne entre les atomes correspondants de deux structures superposées, en particulier entre une pose prédite par docking et une conformation de référence, généralement celle issue de la structure cristallographique du complexe.

Dans cette étude, la RMSD a été calculée afin de comparer les différentes poses obtenues, soit entre elles, soit par rapport à la position expérimentale du ligand. Cette analyse permet d'évaluer la capacité du protocole de docking à reproduire la conformation native du ligand.

Pour valider la méthode utilisée, une approche de re-docking a été appliquée, consistant à recalculer l'interaction du ligand cristallographique avec sa cible afin de vérifier si la pose générée correspond à la conformation réelle observée dans la structure expérimentale.

Selon Sen et al ^[13]. Une pose est considérée comme fiable et représentative du mode d'interaction natif si sa RMSD est inférieure ou égale à 2,0 Å, un seuil communément accepté dans les études de docking protéine-ligand.

À l'issue de ce processus, des superpositions ont été effectuées entre les poses obtenues de l'acide benzhydroxamique (BHO) via AutoDock Vina et la structure cristallographique du ligand dans la POD (Figure V.5). La valeur du RMSD calculée pour la meilleure pose est de 1,1935 Å, indiquant un bon recouvrement structural avec la conformation expérimentale et confirmant ainsi la fiabilité du protocole de Docking utilisé.

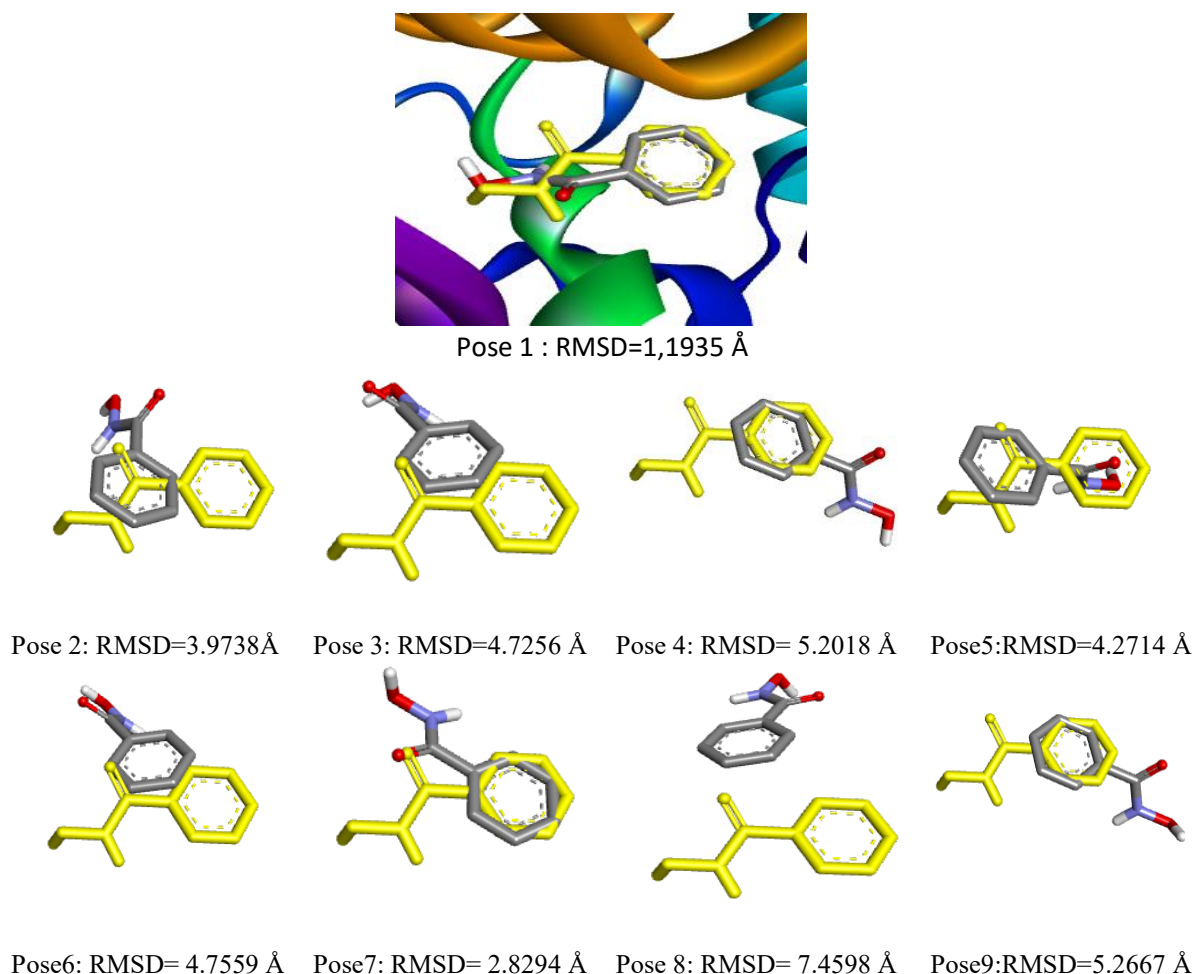


Figure V.5 : Validation de re-Docking : couleur jaune X-ray, gris résultat Dock.

V.5. Energie de liaison de docking moléculaire

L'analyse par docking moléculaire a permis d'évaluer l'affinité de deux composés antioxydants naturels, l'acide citrique et l'acide ascorbique, vis-à-vis de deux enzymes oxydatives clés : la polyphénoloxydase (PPO) et la peroxydase (POD). Les énergies de liaison ($\Delta G_{\text{binding}}$), estimées à l'aide du logiciel AutoDock Vina, sont résumées dans le tableau V.3. Ces valeurs permettent de prédire la stabilité des complexes formés entre chaque ligand et l'enzyme cible.

L'énergie de liaison est calculée selon l'équation suivante ^[14] :

$$\Delta G_{\text{binding}} = \Delta G_{\text{complexe}} - \Delta G_{\text{ligand}} - \Delta G_{\text{protéine}}$$

Tableau V.3 : $\Delta G_{\text{binding}}$ (Kcal/mol), prédite per AutoDock Vina des composés étudiés.

Ligands	$\Delta G_{\text{binding}}$ (Kcal/mol)	
	PPO	POD
Acide citrique	-5,9	- 6,3
Acide ascorbique	-6,1	- 5,7

L'interprétation des résultats se base sur le principe selon lequel une énergie de liaison plus faible (valeur ΔG plus négative) indique une affinité plus élevée du ligand pour sa cible enzymatique. Ainsi :

- Avec l'enzyme PPO, l'acide ascorbique présente une meilleure affinité (-6,1 kcal/mol) que l'acide citrique (-5,9 kcal/mol).



Classement des affinités : acide ascorbique > acide citrique

- Avec l'enzyme POD, l'acide citrique montre une affinité plus importante (-6,3 kcal/mol) que l'acide ascorbique (-5,7 kcal/mol).



Classement des affinités : acide citrique > acide ascorbique

Ces différences d'affinité suggèrent que les deux ligands peuvent agir comme inhibiteurs potentiels, avec une efficacité qui varie en fonction de l'enzyme ciblée. De manière générale, les interactions entre les ligands et les récepteurs protéiques reposent sur des forces de faible énergie, telles que les liaisons hydrogène, les interactions hydrophobes, les forces de Van der Waals ou encore les interactions électrostatiques.

Dans cette étude, une attention particulière a été portée à l'identification et l'analyse des interactions spécifiques entre les deux ligands étudiés et les résidus actifs des enzymes PPO et POD, afin de mieux comprendre leur mécanisme d'inhibition à l'échelle moléculaire.

V.6. Interaction protéine/ligand

Le docking moléculaire permet d'analyser les liaisons non covalentes établies entre un ligand et une protéine cible. Les types d'interactions identifiés (liaisons hydrogène, interactions hydrophobes, électrostatiques, etc.) sont déduits à partir des résultats fournis par le logiciel Discovery Studio Visualizer.

Les figures ci-dessous illustrent de manière schématisée les interactions spécifiques observées entre les ligands étudiés et les résidus du sites actifs des enzymes, telles que déterminées par les simulations de docking.

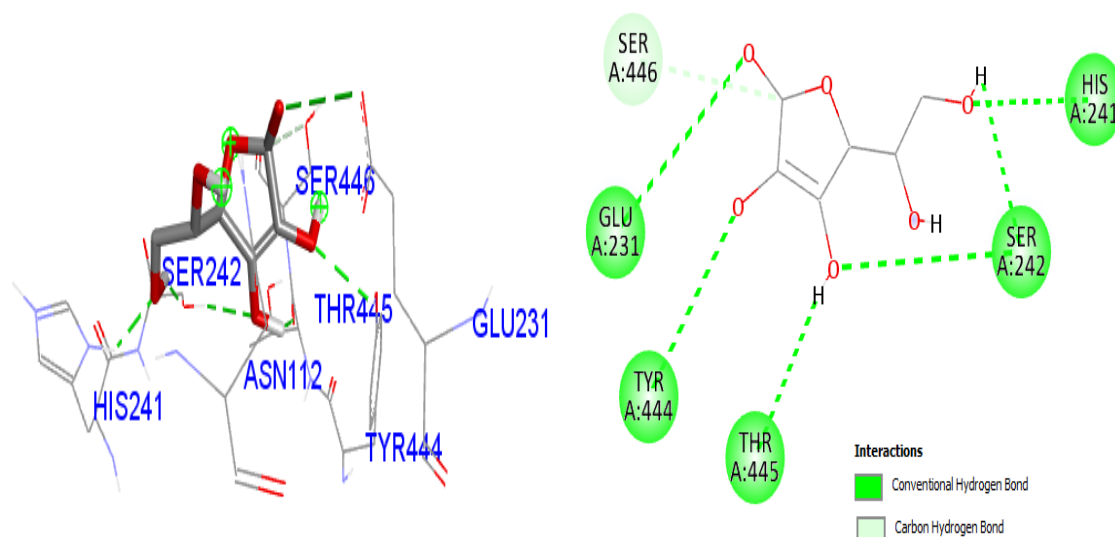


Figure V. 6 : Les interactions entre les sites actifs de PPO et d'acide ascorbique.

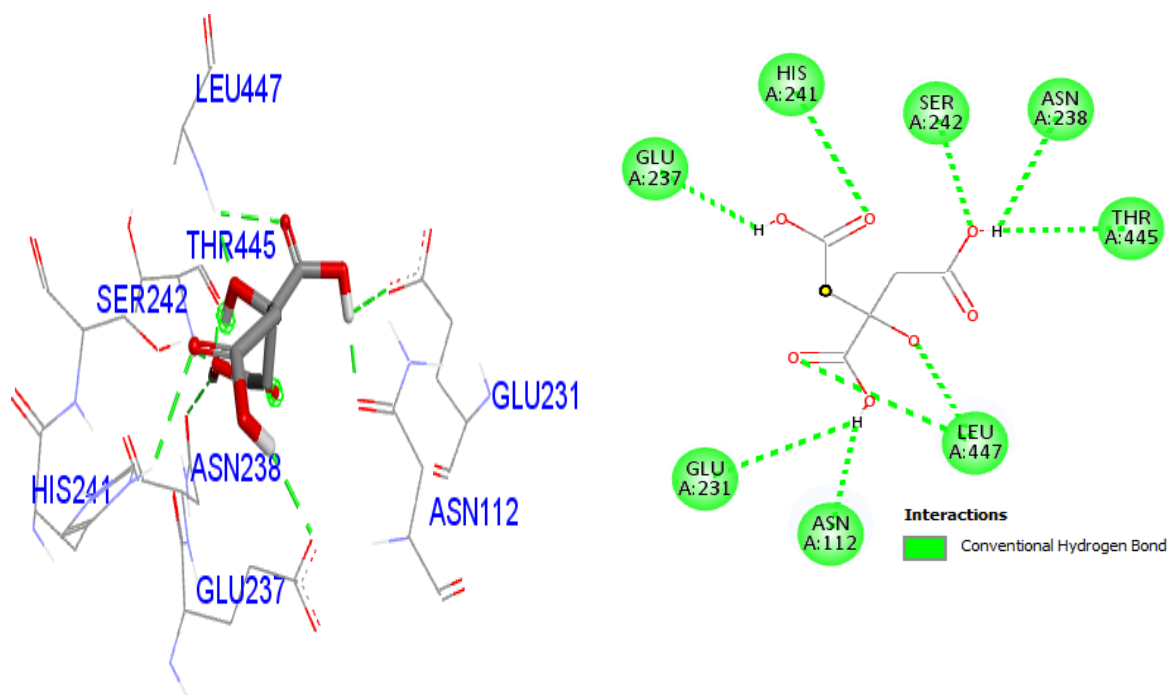


Figure V. 7 : Les interactions entre les sites actifs de PPO et d'acide citrique.

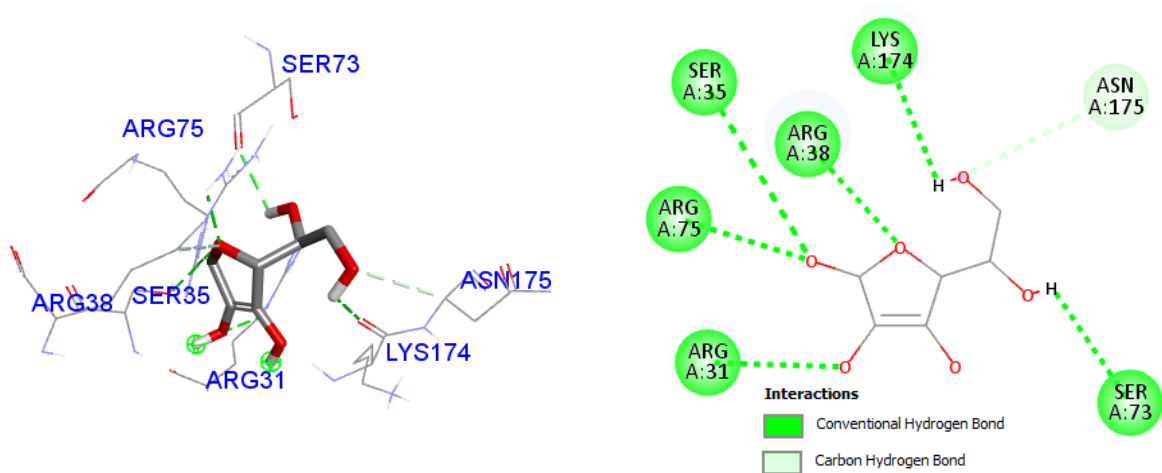


Figure V. 8 : Les interactions entre les sites actifs de POD et d'acide ascorbique.

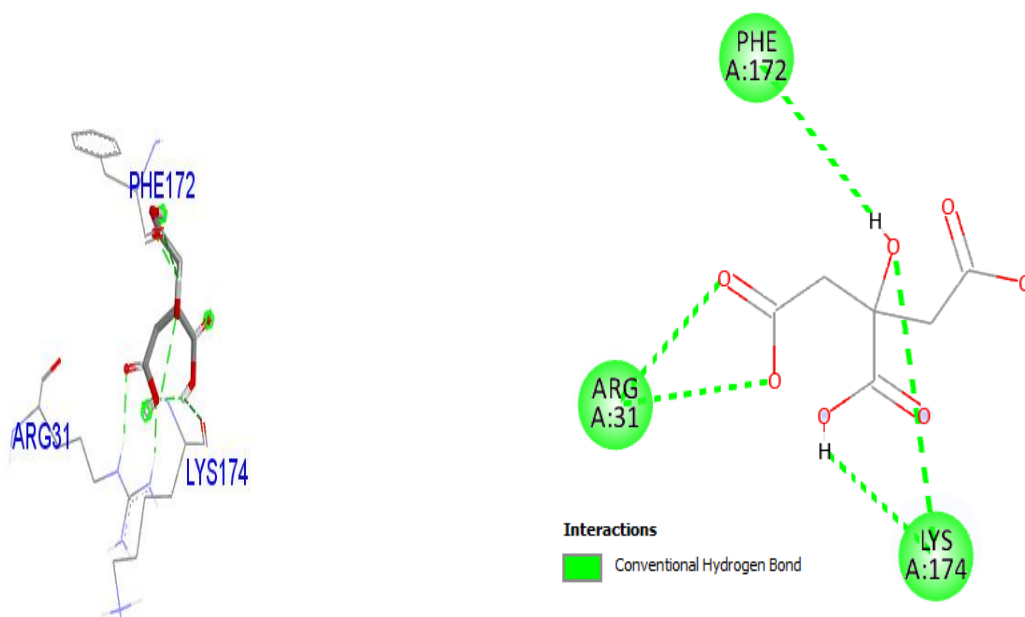


Figure V. 9 : Les interactions entre les sites actifs de POD et d'acide citrique.

Les tableaux suivants présentent un récapitulatif des interactions hydrogène les plus significatives mises en évidence lors des simulations de docking moléculaire entre les deux ligands (acide citrique et acide ascorbique) et les enzymes ciblées, PPO et POD. Ces interactions sont caractérisées par les distances interatomiques mesurées entre les groupements fonctionnels des ligands et les résidus d'acides aminés situés au niveau du site actif des enzymes.

Tableau V.4 : Les interactions hydrogène du polyphénoloxydase (PPO) avec les ligands.

Ligand	Acides aminés	Distance (Å)	Acides aminés	Distance (Å)
Acide ascorbique	HIS241	2,14154	THR445	2,5396
	SER242	2,58758	SER242	1,81819
	TYR444	2,61139	SER446	3,32015
	GLU231	3,31254	-	-
Acide citrique	HIS241	2,54892	ASN238	2,36042
	SER242	1,96195	THR445	2,20858
	LEU447	2,39535	ASN112	1,94758
	LEU447	1,82798	GLU231	2,7651
	GLU237	2,1495	-	-

Tableau. V. 5 : Les interactions hydrogène de la peroxydase (POD) avec les ligands.

Ligand	Acides aminés	Distance (Å)	Acides aminés	Distance (Å)
Acide ascorbique	ARG31	2,27213	LYS174	2,31764
	ARG38	2,10933	SER73	2,47312
	ARG75	2,97583	ARG38	2,88531
	SER35	3,1232	ASN175	3,69729
Acide citrique	ARG31	2,2777	PHE172	2,77854
	ARG31	2,04377	LYS174	2,61206
	LYS174	2,8526	-	-

L'analyse des interactions hydrogène issues du docking moléculaire permet de mieux comprendre le mode de fixation des ligands dans le site actif des enzymes ciblées. Les résultats obtenus révèlent que les deux ligands, l'acide citrique et l'acide ascorbique, établissent plusieurs liaisons hydrogène spécifiques avec des résidus d'acides aminés clés des enzymes PPO et POD, témoignant d'une stabilité structurale et d'une affinité potentielle favorable.

Parmi l'ensemble des interactions non covalentes pouvant intervenir dans l'ancrage entre une protéine et un ligand, telles que les interactions hydrophobes, les forces de Van der Waals ou les interactions électrostatiques, les liaisons hydrogène jouent un rôle essentiel dans la reconnaissance moléculaire et la stabilisation du complexe ligand-protéine. Elles permettent une orientation précise du ligand dans le site actif, renforcent la spécificité de l'interaction, contribuent significativement à l'énergie globale de liaison et facilitent la formation d'un réseau d'interactions cohérent avec les résidus catalytiques. Ce type d'interaction est donc crucial pour stabiliser le complexe enzyme-ligand et soutenir un potentiel effet inhibiteur à l'échelle moléculaire. D'après nos résultats, on observe que :

- Avec la PPO, l'acide citrique forme un total de 9 liaisons hydrogène, notamment avec HIS241, SER242, GLU231 et ASN238, impliquant des distances courtes (< 2,5 Å), traduisant une bonne stabilité du complexe. L'acide ascorbique, de son côté, établit 7 liaisons hydrogène avec des résidus similaires, dont TYR444 et SER446, soulignant une affinité compétitive.
- Avec la POD, l'acide ascorbique montre 8 interactions hydrogène, principalement avec ARG31, ARG38, LYS174 et SER35, illustrant sa bonne capacité de fixation à travers des groupements polaires. L'acide citrique forme 5 liaisons hydrogène, avec

une interaction double avec ARG31, ce qui reste significatif malgré un nombre inférieur.

Ces liaisons hydrogène courtes et ciblées, souvent localisées au cœur du site actif, indiquent une interaction spécifique et potentiellement inhibitrice des deux ligands vis-à-vis des enzymes étudiées. Leur présence constitue un indicateur majeur d'un bon ancrage moléculaire, condition nécessaire à une éventuelle activité biologique (inhibition enzymatique).

V.7.Conclusion

Cette étude met en évidence l'intérêt du docking moléculaire comme outil prédictif pour la sélection de composés bioactifs naturels dans les procédés de conservation. Elle souligne la pertinence de deux ligands naturels, l'acide ascorbique et l'acide citrique, pour limiter l'oxydation enzymatique, contribuant ainsi à améliorer la stabilité, l'aspect et la durée de conservation des produits à base de tomate, par inhibition des deux enzymes impliquées dans leur dégradation. Il convient de noter que l'acide citrique et l'acide ascorbique, bien qu'étant des composés naturellement présents dans la tomate, sont également largement utilisés comme additifs dans l'industrie agroalimentaire. Leur incorporation dans les produits transformés contribue à renforcer leurs propriétés antioxydants, à améliorer la stabilité microbiologique et à prolonger la durée de conservation des concentrés de tomate.

Références bibliographiques

- [1] **Sotriffer C, Klebe G, Stahl M, Böhm HJ (2003)**, Docking and Scoring Functions/Virtual Screening. *Burger's Medicinal Chemistry and Drug Discovery* 281-331.
- [2] **Bendib S, 2021**, « Docking moléculaire : Quercétine – SARS-CoV2 », Mémoire Master.
- [3] **Site web** : <https://www.slideserve.com/belden/docking-et-scoring>, consulter le 28/04/2025.
- [4] **Kitchen DB, Decornez H, Furr JR, Bajorath J (2004)**, Docking and scoring in virtual screening for drug discovery: methods and applications. *Nat Rev Drug Discovery* 3: 935 949.
- [5] **Medigue nor el houda (2021)**, Contribution théorique à l'étude de l'effet de la complexation par coordination métallique de molécules d'origine naturelle et d'intérêt thérapeutique. Thèse de doctorat. Université STHB.
- [6] **Trott, O., Olson, A. J. (2010)**, AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455–461.
- [7] **Site web**: «<https://discover.3ds.com/discovery-studio-visualizer> » (consulté le 12/04/2025).
- [8] **Trott O and Olson A.J., (2010)**, AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading; *J.Comput. Chem*; 31.p455.
- [9] **Site web** : « <https://iledefrance-unowhy.com> » (consulté le 23/04/2025).
- [10] **Karboua L.A, (2021)**, « Docking moléculaire in silico et propriété ADMET de certains composants d'huile de graines de *Lepidium Sativum* contre L'Acétylcholinestérase pour le traitement de la maladie d'Alzheimer », Mémoire Master.
- [11] **Spyrakis, F., Sarkar, A., Kellogg, G. E. (2021)**, Docking, Scoring, and Virtual Screening in Drug Discovery. *Burgerr's Medicinal Chemistry and Drug Discovery* (8th ed. pp. 1–102). Wiley.

-
- [12] **Monge, A. (2006)**, Création et utilisation de chimio thèques optimisées pour la recherche « in silico » de nouveaux composés bioactifs (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).
- [13] **Sen, S., et al. (2018)**, Is It Reliable to Take the Molecular Docking Top Scoring Position as the Best Solution Without Considering Available Structural Data? *Molecules*, 23(5), 1038.
- [14] **Bencheikh B, (2022)**, « In Silico Study of Selected Natural Products as SARS-CoV-2 M Pro Binder: Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulation » *journal of polycyclic Aromatic Compounds*.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail a permis d'explorer, selon deux approches complémentaires, des axes fondamentaux dans l'évaluation de la qualité du concentré de tomate local (CAB) : d'une part, une approche expérimentale reposant sur des analyses physico-chimiques et rhéologiques ; d'autre part, une approche *in silico* fondée sur la modélisation moléculaire par docking.

Les résultats des analyses de laboratoire ont confirmé la conformité du produit étudié aux normes de qualité en vigueur, notamment en ce qui concerne l'acidité, la teneur en matière sèche, la couleur, la consistance et le comportement rhéologique. Ces paramètres indiquent que le concentré CAB présente une stabilité technologique satisfaisante, ainsi qu'une bonne aptitude à la conservation, sans qu'il soit nécessaire de recourir à des traitements thermiques ou à l'ajout d'agents conservateurs. Par ailleurs, l'étude rhéologique a mis en évidence un comportement pseudoplastique et élastique, favorable aux étapes de transformation, de conditionnement et à l'acceptabilité finale du produit.

La seconde partie du travail, consacrée à la modélisation moléculaire, a mis en évidence une affinité notable de l'acide citrique et de l'acide ascorbique envers les enzymes polyphénoloxydase (PPO) et peroxydase (POD), impliquées dans les processus d'oxydation des composés phénoliques de la tomate. Les énergies de liaison obtenues par docking, ainsi que le nombre et la nature des interactions identifiées, notamment les liaisons hydrogène suggèrent un potentiel inhibiteur réel de ces deux composés naturels. L'acide ascorbique a montré une affinité plus marquée envers la PPO, tandis que l'acide citrique s'est révélé plus efficace contre la POD.

Ainsi, ce travail met en évidence l'intérêt d'une approche intégrative, combinant expérimentation et modélisation, pour la valorisation et l'amélioration de la qualité des produits agroalimentaires. Les résultats obtenus soulignent également le rôle technologique et conservateur potentiel de l'acide citrique et de l'acide ascorbique comme inhibiteurs naturels d'enzymes oxydatives, contribuant à la stabilité, à l'apparence et à la durée de vie des produits transformés à base de tomate.

Les perspectives de ce travail incluent l'utilisation de simulations dynamiques moléculaires (MD) afin de mieux comprendre la stabilité et la dynamique des complexes ligand-enzyme au cours du temps, ainsi que la réalisation de tests *in vitro* ou *in vivo* pour confirmer l'effet inhibiteur des acides citrique et ascorbique sur les enzymes PPO et POD, et évaluer leur impact sur la conservation et la qualité du concentré de tomate.

Annexes

1. Rhéologie

1.1.Types de rhéomètre rotationnel

Le rhéomètre rotationnel représente le modèle classique de rhéomètre rotatif. Ce matériel est très polyvalent. Il est adapté à de nombreuses études rhéologiques, allant d'une simple mesure de viscosité, à la détermination du seuil d'écoulement. Il permet également d'analyser divers types de produit fluides :

- **Le rhéomètre à cylindre coaxiaux (couette)** : il utilise un système de fonctionnement basé sur l'écoulement de couette. Le produit à étudier est placé entre deux cylindres, dont l'un en rotation et l'autre fixe. Ce type de rhéomètre est idéal pour l'analyse de liquides de très faible viscosité.
- **Le rhéomètre cône-plan (ou CP)** : cet instrument de mesure est constitué par un disque et un cône, animé par un mouvement rotatif autour de leur axe commun. L'angle de cône θ (voir schéma) est très faible ($\leq 4^\circ$) pour obtenir un taux de cisaillement vertical constant dans le volume de mesure ; nettoyage rapide. C'est le type de notre rhéomètre étudié Bohlin CVO.
- **Le rhéomètre à plateaux parallèles (plan-plan ou PP)** : ce matériel est formé de deux disque coaxiaux, placés l'un au-dessus de l'autre, il utilise une petite quantité de liquide lors de l'analyse. Celui-ci sert à l'étude de produit) particules, ou chargés, comme les polymères fondus, il se nettoie et s'installe aisément.
- **Le rhéomètre à torsion rectangulaire** : il fonctionne en appliquant une torsion à un échantillon de matériau, généralement sous forme de plaque ou de fil, et en mesurant la réponse de l'échantillon) la contrainte appliqué.

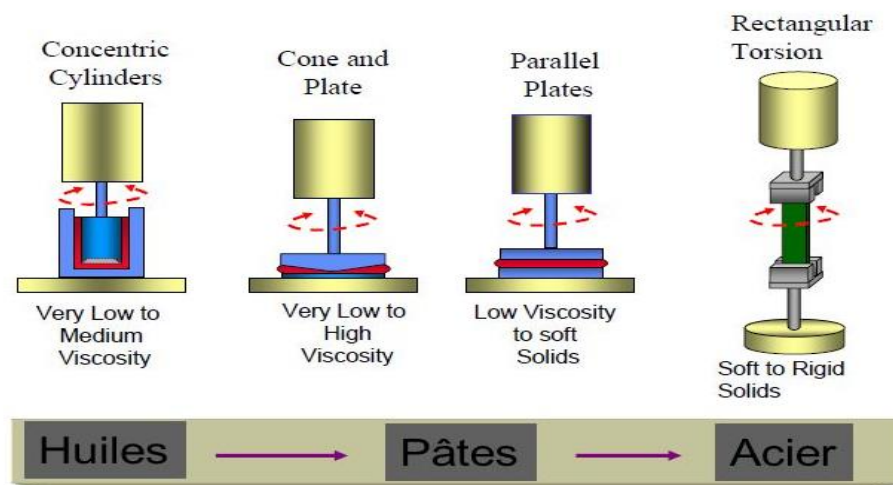


Figure 1: Types de Rhéomètre rotationnel.

1.2. Utilité de la rhéologie

Les études rhéologiques sont utiles pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, en particulier leur comportement sous contrainte. Les principales utilisations courantes des études rhéologiques sont :

- Conception de produits : les études rhéologiques peuvent aider à la conception de produits en déterminant les propriétés viscoélastiques des matériaux, tels que les polymères, les suspensions, les crèmes, les gels, les pâtes, etc. ces propriétés peuvent influencer les performances du produit, comme la texture, la stabilité, la fluidité, la viscosité, etc.
- Optimisation de procédés : les études rhéologiques peuvent être utilisées pour optimiser les procédés de fabrication de produits. Par exemple, les propriétés rhéologiques des matériaux peuvent être ajustées en modifiant les paramètres de processus tels que la température, le taux de cisaillement, la concentration, etc.
- Contrôle qualité : les études rhéologiques peuvent aider à garantir la qualité des produits en mesurant et en comparant les propriétés rhéologiques des échantillons à des normes de référence.
- Compréhension des mécanismes de déformation : les études rhéologiques peuvent fournir des informations sur les mécanismes de déformation des matériaux, tels que l'élasticité, la viscosité, la plasticité, l'écoulement, la rupture, etc. ces informations peuvent être utiles pour mieux comprendre les propriétés mécaniques des matériaux et leur comportement sous contrainte.
- Développement de modèles mathématiques : les études rhéologiques peuvent aider à développer des modèles mathématiques pour prédire le comportement des matériaux sous différentes contraintes. Ces modèles peuvent être utilisés pour optimiser les propriétés des matériaux ou pour concevoir des produits.

2. Docking : Bases des données

2.1. Protein Data Bank (PDB)

Est un peu comme un coffre-fort rempli de plans 3D de protéines, notamment celles qui intéressent l'industrie pharmaceutique pour la création de médicaments. C'est la source principale pour tout ce qui concerne la structure des molécules biologiques. Les scientifiques arrivent à obtenir ces modèles tridimensionnels pointus : la cristallographie aux rayons X et la résonance magnétique nucléaire (RMN).

2.2. PubChem

Est une banque de données publique de biologie chimique qui est élaborée et gérée par National centre for Biotechnology Information (NCBI) appartenant à bibliothèque nationale de médecine (NLM) au sein des U.S. National Institutes of Health (NIH).

Elle regroupe 247.3 millions de descriptifs de molécules provenant de plusieurs dizaines de bases de données avec un accès gratuit au public qui est disponible sur le site web : « <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov> ».

3.3. Liste des acides aminés étudiés

Abréviation	Signification	Structure chimique
PHE	Phenylalanine	$C_9H_{11}O_2$
SER	Serine	$C_3H_7NO_3$
GLY	Glycine	$C_2H_5NO_2$
ARG	Arginine	$C_6H_{14}N_4O_2$
LYS	Lysine	$C_6H_{14}N_2O_2$
ALA	Alanine	$C_3H_7NO_2$
HIS	Histidine	$C_6H_9N_3O_2$
TYR	Tyrosine	$C_9H_{11}NO_3$
THR	Threonine	$C_4H_9NO_3$
GLU	GlutamicAcide	$C_5H_9NO_4$
LEU	Leucine	$C_6H_{13}NO_2$
ASN	Asparagine	$C_4H_8N_2O_3$

Résumé

Ce travail porte sur l'évaluation de la qualité d'un concentré de tomate local (CAB) à travers des analyses physico-chimiques et rhéologiques. Les résultats ont montré que le produit est conforme aux normes, stable, et présente un comportement pseudoplastique et élastique. Une seconde partie a porté sur une étude de docking moléculaire visant à évaluer le potentiel inhibiteur de l'acide citrique et de l'acide ascorbique contre les enzymes PPO et POD. Les résultats ont révélé une bonne affinité de ces composés naturels avec les enzymes ciblées, suggérant leur efficacité pour limiter l'oxydation des composés phénoliques responsables du brunissement enzymatique et ainsi préserver la couleur naturelle de la tomate.

Mots clés : Tomate, docking, analyses physico-chimiques, rhéologie.

Abstract

This study focuses on the quality assessment of a local tomato concentrate (CAB) through physico-chemical and rheological analyses. The results demonstrated that the product complies with standards, is stable, and exhibits pseudoplastic and elastic behavior. The second part of the work involved a molecular docking study aimed at evaluating the inhibitory potential of citric acid and ascorbic acid against the enzymes polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD). The results revealed a strong affinity of these natural compounds for the targeted enzymes, suggesting their effectiveness in limiting the oxidation of phenolic compounds responsible for enzymatic browning, thereby preserving the natural color of the tomato.

Keywords: Tomato, docking, physicochemical analyses, rheology.

ملخص

يهدف هذا العمل الى تقييم جودة الطماطم المركزة المحلية (CAB) من خلال تحاليل فيزيوكيميائية والريولوجية. أظهرت النتائج ان المنتج مطابق للمعايير، مستقر، ويتميز بسلوك شبه بلاستيكي ومرن جزئيا. تناول الجزء الثاني دراسة الالتحام الجزيئي بهدف تقييم القدرة التثبيطية لحمض السيترريك وحمض الاسكوربيك ضد انزيمات PPO وPOD. وقد كشفت النتائج عن تقارب جيد لهذه المركبات الطبيعية مع الانزيمات المستهدفة، مما يشير الى فعاليتها في الحد من اكسدة المركبات الفينولية المسؤولة عن الاسمرار الانزيمي وبالتالي الحفاظ على اللون الطبيعي للطماطم. الكلمات المفتاحية: طماطم، الالتحام الجزيئي، تحاليل فيزيوكيميائية، ريولوجيا.