

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA –BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de master

En Génie des procédés

Spécialité : Génie Alimentaire.

Thème :

***Optimisation des paramètres d'un jus de tomate par les plans
d'expériences***

Présenter par :

MENICHE AMEL & MAHFOUF SOUAD

Devant le jury composé de :

Mr. Fatmi Sofiane	MCA	Université de Bejaia	Président
Mr. Azzoug Mouffok	MCA	Université de Bejaia	Examineur
Mme. Chibani Nacera	MCB	Université de Bejaia	Promotrice

Année universitaire : 2020 / 2021.

Remerciements

Avant tous nous remercions le dieu qui nous a donné le courage et la force pour continuer. Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

*En guise de reconnaissance, nous tenons fort à remercier notre promotrice **Mme CHIBANI Nacera** qui nous a attribué beaucoup de son temps. Nous la remercions pour l'aide qu'elle nous a apporté pour réaliser ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont au **Dr FATMI Sofiane** d'avoir accepté la présidence du jury, nous tenons compte à exprimer toutes nos reconnaissances au **Dr AZZOUG Moufok** qui nous a fait l'honneur d'examiner notre travail, leurs regards critiques ne sauront que rehausser le niveau de notre savoir-faire. Nos vifs remerciements s'adressent aussi à **Mme BELKHIRI Wassila** et **Mlle HARRATE Imene** pour leur précieuse collaboration.*

*Nous remercions aussi **Mme BRADAY** et **Mme AMRANI** pour leur aide précieux sur le terrain, au personnel de laboratoire Génie des procédés pour leur gentillesse et disponibilité.*

Nos vifs remerciements à nos familles et nos amis et amies pour leur soutien inconditionnel.

Merci en fin pour tous ceux et celles qui nous ont aidées d'une façon ou d'une autre lors de notre travail, nous les remercions du fond du cœur.

Merci ...

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*A Dieu, tout puissant, qui m'a donné la force, la santé et le courage de réaliser
Ce précieux travail.*

*A mon très chère frère Nassime. Dieu t'accueillera dans son vaste paradis.
Tu me manques tellement, ma vie sans toi est amère*

*A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui
Qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu le garde.*

Mon Père

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, ma vie et mon bonheur.

Ma mère

A mes chères frères Youcef, Idir et mon chère jumeau Yacine.

*. Vous êtes si cher à mon cœur que je n'envisage pas ma vie sans vous. Je vous
aime de toutes mes forces !!!*

*A mes chères, tata Lynda et son époux Mr AKDIM Abdlghani. je vous aime
tellement*

*A mes très chères amies et amis: Kamel, Aimade, Nassime, Youva, kamilia,
Lydia, Sarah, Siham, wissem, Amel, Nesrine, Djidji, Massylia, Ikrame, Mounia
et Souad. Vous êtes des frères et sœurs à moi*

*A mes enseignants et enseignantes de département Génie des procédés et à toute
la promotion Master Génie alimentaire 2020/2021 et à toutes les personnes que
j'aime...*

A tous ce qui m'ont apporté d'aide de près ou de loin.

Amel

Dédicace

*A l'aide de DIEU, le tout puissant ce travail est achevé, je le dédie à toutes
personnes que j'aime*

A mon père et à ma mère :

*L'honneur de ce travail revient à mes très chers parents pour leur affection, leur
sacrifices et encouragements pendant ma formation et que dieu les protège et les
garde en bonne santé*

A mes chères sœurs : Djamila, Hakima, Didouch, Biha

A mon frère : Belkacem

A toi Rabia pour ton soutien, merci beaucoup

A toi ma collègue : Amel

*A tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de
ce mémoire.*

Souad

Liste des figures

N°	Titre	Page
01	Diffusion de la tomate dans le monde	05
02	Anatomie de plant de tomates	07
03	Racines d'un plant de tomates concentrées dans les premiers 30 centimètres	08
04	Tige de plant de tomates	08
05	Feuilles d'un plant de tomates	09
06	Fleurs d'un plant de tomates	10
07	Anatomie du fruit du plant de tomates (la tomate)	11
08	Différentes formes de la tomate	12
09	Quelques variétés de tomates	12
10	Variétés de tomates qui se trouvent en Algérie	13
11	Composition chimique de la matière sèche de la tomate	14
12	Principaux pays producteurs de la tomate (million de tonnes)	18
13	Labourage de sol avant la culture	22
14	Lits et caissettes à semis	23
15	Pinçage des gourmandes de la plante de tomate	23
16	Tuteurage des plantes de tomate	24
17	Serres à tomate	24
18	Diagramme de transformation des tomates	28
19	Quelques variétés d'orange	33
20	Quelques variétés de la mandarine	33
21	Quelques variétés de citron	34

22	Exemples de limes acides	35
23	Différents types de pamplemousse	36
24	Pomelo March	37
25	Kumquat marumi	37
26	Citronnier 4 saisons	40
27	Limon Mayer	41
28	Citron caviar, citrus australasica (arbre et fruit)	41
29	Citrus aurantifolia, citron Gallet	42
30	Citronnier YUZU, bio agrume rare	42
31	Quelques citrons doux, de Rome et Iran	42
32	Caractéristiques morphologiques d'un citron	42
33	Etapes de fabrication d'un concentré de fruits	43
34	Processus de fabrication de produit fini à partir de concentré de fruits	56
35	Estimation de la production des boissons en Algérie pour l'année 2008	57
36	Domain de variation de la vitesse est constitué de toutes les vitesses comprises entre 80 et 120Km/h. le niveau bas de facteur est noté -1 et le niveau haut +1	58
37	Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi définit un espace expérimental	58
38	Domain d'étude définit par la réunion des domaines des différents facteurs	59
39	Exemple d'une matrice d'expérience	60
40	Meilleurs emplacements des points expérimentaux	64
41	Plan factoriel complet	65
42	Plan de Koshal pour trois facteurs	66
43	Plan en carré latin	71
44	Plan composite pour deux facteurs	72

45	Plan de Doehlert	73
46	Plan de Box-Behnken pour trois facteurs	73
47	Représentation des mélanges à trois constituants	76
48	Représentation des mélanges à quatre constituants	76
49	Types de plan de mélange	77
50	Représentation de l'étude d'un mélange à trois constituants soumis à deux facteurs	77
51	Diagramme de fabrication de jus de tomate	82
52	Diagramme de fabrication de jus de citron	83
53	Diagramme de formulation de jus	84
54	Mesure de pH de jus de tomate et de jus de citron pur	87
55	Réfractomètre	88
56	Préparations des filtrats et réalisation de titrage	89
57	Rhéomètre de couette	90
58	Principe de dosage	91
59	Préparation de la solution	92
60	Dosage de la solution par le DCPIP et mesure de l'absorbance	94
61	Préparation et dosage de l'extrait de jus de tomate	94
62	Modification du DPPH lors de transfère électronique	94
63	Evaluation d'activité antioxydante de la boisson optimale	95
64	Préparations nécessaires pour la dégustation	97
65	Formules données par le MODDE6	101
66	Résultats d'analyses physicochimiques de jus de tomate pur	102
67	Résultats d'analyses physicochimiques de jus de citron pur	103

68	Résultats de pH des boissons formulées	103
69	Résultats de degré brix des boissons formulées	104
70	Résultats de l'acidité titrable des boissons formulées	105
71	Résultats de la viscosité des boissons formulées	106
72	Facteurs statistiques obtenus	108
73	Modèle proposé pour chaque réponse	109
74	Histogramme représentant l'influence des facteurs sur le Brix°	110
75	Histogramme représentant l'influence des facteurs sur l'acidité	111
76	Pouvoir discriminant par descripteur des boissons dégustées	115
77	Coefficients des modèles des boissons dégustées	116
78	Profile des différentes classes créés par le panel expert, selon les notations de préférence des boissons dégustées	119
79	Corrélation entre les variables et les facteurs de panel expert pour les boissons dégustées	122
80	Carte de préférences et courbe de niveaux des produits étudiés nommés ; BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6 et BT7	124

Liste des tableaux

N°	Titre	page
01	Teneurs des constituants majoritaires de la tomate (pour 100g de produit frais)	12
02	Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate	17
03	Espacement de plantation pour les trois types (selon le mode de croissance) des plantes de tomate	21
04	Composition biochimique moyenne dans 100g de citron	43
05	Grands producteurs de citron et lime dans le monde	46
06	Caractéristiques physicochimiques de jus de citron	46
07	Table de composition de quelques jus de fruits	51
08	Apports journaliers recommandés en vitamines pour 100g de jus	52
09	Principaux pays producteurs de jus de fruits	58
10	Principaux pays consommateurs de jus de fruits	59
11	Estimations sur la consommation nationale des jus de fruits	60
12	Matrice expérimentale de plan de Box-Behnken pour trois facteurs	77
13	Principaux logiciels de plans d'expériences	82
14	Matrice d'essai proposée par le MODDE6	88
15	Préparation des dilutions d'acide ascorbique pour la réalisation de la courbe standard de la vitamine C	94
16	Préparation des dilutions d'acide gallique pour la réalisation de la courbe standard des polyphenols totaux	96
17	Matrice d'étude complétée	109
18	Valeurs numériques des caractéristiques numériques	110
19	Valeurs cibles en Brix° et acidité	115
20	Obtention de l'optimum	116
21	Résultats d'analyses physicochimiques effectuées sur l'optimum	116
22	Moyennes ajustées par produits	119
23	Pourcentages d'appréciation des boissons dégustées	124

Sommaire

Introduction

Chapitre I : Généralités sur la tomate

N°	Titre	Page
I	Histoire et origine	04
II	Définition linguistique de mot tomate	06
III	Définition botanique de la tomate	06
IV	Description botanique de plant de tomate	07
1	Racines	07
2	Tige	08
3	Feuilles	08
4	Fleurs	09
5	fruit ; la tomate	10
6	Grains	11
V	Variétés et formes de tomates	11
VI	Types de tomates	13
1	Tomate de table	13
2	Tomate industrielle	13
VII	Composition chimique de la tomate	14
VIII	Intérêts de la tomate	17

1	Intérêts économiques	17
2	Importances nutritionnelles	18
3	Intérêts médicinales	19
IX	Culture des tomates	20
1	Conditions nécessaires pour une bonne culture	20
a	Température et lumière	20
b	Eau et humidité	20
c	sol	21
2	Choix d'une variété	21
3	Préparation et plantation	22
a	Préparation de sol	22
b	Semis et préparation des pépinière	23
c	Repiquage	23
4	Pratique de la culture	24
a	Usage des fumiers et des fertilisants	24
b	Arrosage	25
c	Taille	25
d	Système de tuteurage	26
e	Protection des plantes	27
X	Pathologies et ravageurs	28
1	Pathologie physiologique	29
2	Pathologie fongique ou cryptogamique	29
3	Pathologie bactérienne	30

4	Maladies virale	30
XI	Technologie de transformation de la tomate	30

Chapitre II : Généralités sur Les agrumes ; le citron

N°	Titre	Page
I	Agrumes	32
1	Historique de la culture des agrumes	32
2	Définition	33
3	Espèces et variétés	33
a	Oranges	33
b	Mandarines	35
c	Citrons	36
d	Limes acides	36
e	Pamplemousses	37
f	Pomelos	37
g	Kumquats	38
4	Production des agrumes	39
a	Production mondiale	39
b	Production nationale	39
II	Citron	40
1	Histoire et origine	40
2	Définition	40
3	Types et variétés	41
a	Citronnier 4 saisons	41

b	Citronnier Meyer	43
c	Citron caviar	43
d	Citronnier Gallet	44
e	Citronnier YUZU	44
f	Citronnier doux	45
4	Anatomie et morphologie	45
5	Composition biochimique	45
6	Valeur nutritive et effet thérapeutique	46
7	Production de citron	46
8	Jus de citron	47

Chapitre III : jus de fruits

N°	Titre	Page
I	Définition	49
II	Différents types de jus de fruits	49
III	Composition biochimique et impotence nutritionnelle	51
IV	Technologie de fabrication des jus de fruits	52
1	Préparation des fruits pour la transformation	52
2	Traitements préalables de la matière première avant l'extraction	53
3	Extraction des jus	53
4	Traitements des jus	56
V	Production des jus de fruits	56
1	Production mondiale	57
2	Production nationale	58

VI	Consommation des jus de fruits	58
1	Consommation mondiale	59
2	Consommation nationale	60

Chapitre IV : Notion des plans d'expériences

N°	Titre	page
I	Historique	62
II	Définition	63
III	Objectifs et intérêts des plans d'expériences	63
IV	Domain d'application	63
V	Terminologie	63
VI	Méthodologie de mise en place d'un plan d'expériences	67
VII	Différents types de plans d'expérience utilisés	68
1	Plans factoriels complets à deux niveaux	68
2	Plans factoriels fractionnaire à deux niveaux	69
3	Autres plans à deux niveaux	70
4	Plans à plusieurs niveaux	71
5	Plans pour surfaces de réponse	73
6	Plans de mélanges	78
7	Plans booléens	81
8	Plans pour simulation numérique	81
VIII	Logiciels pour les plans d'expériences	82

Chapitre V : Matériels et méthodes

N°	Titre	Page
I	Principe	84
II	Matériels	84
1	Matériels de laboratoire	84
2	Matières premières	84
III	Méthodes	85
1	Préparation des ingrédients	85
2	Formulation de jus	87
IV	Choix d'un plan d'expérience	87
V	Caractérisation physicochimique des boissons formulées	88
1	Détermination de potentiel d'hydrogène	88
2	Détermination de degré brix (AFNOR, 1986)	89
3	Détermination de l'acidité titrable (%)	80
4	Détermination de la viscosité	91
VI	Caractérisation physicochimique de la boisson optimale	92
1	Dosage de la vitamine C	92
2	Dosage des poly phénols totaux	95
3	Test d'activité antioxydante	98
VII	Caractérisation sensorielle des boissons formulées	100

Chapitre VI : Résultats et discussions

N°	Titre	Page
I	Introduction	102

II	Pré-formulation	102
III	Caractérisation physicochimique	103
1	Analyses physicochimiques de la matière première	103
2	Analyses physicochimiques des boissons formulées	105
a	pH	105
b	Brix°	106
c	Acidité titrable (%)	107
d	Viscosité	109
IV	Obtention d'un optimum	110
1	Analyses globales	111
a	Analyse statistique	111
b	Modèle mathématique proposé	112
c	Analyses des effets propres des facteurs sur les réponses	113
2	Détermination de l'optimum	115
V	Caractérisation physicochimique de l'optimum	115
VI	Caractérisation sensorielle des boissons formulées	117
1	Caractérisation des produits	117
a	Pouvoir discriminant par descripteur (attribu sensoriel)	118
b	Coefficients des modèles	119
c	Moyennes ajustées par produits	120
2	Cartographie externe de préférence	121
a	CAH	123
b	ACP	124
c	PREFMAP	125

Conclusion

Introduction



Introduction

L'industrie agroalimentaire est l'un des secteurs qui évolue de jour en jour, c'est un utilisateur important des produits agricoles. Son principal défi aujourd'hui est de faire face à l'accroissement de la population mondiale tout en garantissant un développement durable et en offrant des produits sains. Tous les pays déploient des efforts considérables afin de développer ce secteur et faire de lui une base d'exportation et créateur d'emplois.

Au niveau de la wilaya de Bejaia existe un tissu industriel en particulier dans le secteur agroalimentaire assez dense mais peu diversifié. L'activité de ce secteur s'est fortement développée durant la dernière décennie (2000-2010) suite à l'ouverture du pays à l'économie de marché et la mise en place d'une nouvelle politique d'investissement. Celle-ci a permis à un certain nombre d'unités industrielles de transformation de voir le jour au niveau des zones d'activités industrielles de la wilaya, exemple de TAHARACHT (AKBOU) qui englobe le plus grand pôle national dans l'industrie agroalimentaire.

La consommation des fruits et légumes a un effet santé reconnu qui peut être associé à leur potentiel antioxydant et nutritionnelle, cependant la consommation quotidienne préconisée de 5 portions semble difficile à atteindre. Parmi les freins à la consommation de ces produits, leurs prix élevés, leur saisonnalité, leur fragilité, leur faible durée de consommation sont les raisons couramment évoquées par les consommateurs. Les jus de fruits et de légumes, de par leur praticité, peuvent être un moyen attractif pour contribuer à remplir les objectifs plus de nutrition santé. En termes de consommation de fruits et légumes, un marché porteur se développe autour de jus de fruits aux nouveaux goûts et aux hautes valeurs nutritionnelles.

La tomate est l'un des fruit-légumes les plus consommés et très importante dans l'alimentation dans le monde entier (**Boumendjel et al, 2012**). La production et la consommation mondiale de la tomate occupe la deuxième place après la pomme de terre (**Trichpoulou et Lagio, 1977**).

En Algérie, les cultures maraichères occupent une superficie très importante, estimée à 363030 ha en 2005 et à 372096 ha en 2006 avec un bilan de 2,5 % de rendement. La tomate est beaucoup plus consommée sous forme industrielle. **BACI. (1993)** estime que sa consommation annuelle sous forme de concentrée avoisinerait les 04 kg par an et par habitant. En général, elle est consommée fraîche et également utilisée dans la fabrication d'un éventail de produits (jus, pâte...). Les études épidémiologiques ont prouvé que la consommation de la tomate et des produits à base de la tomate peut protéger contre diverses pathologies. En effet,

Introduction

la tomate est un réservoir de diverses molécules antioxydants dont l'acide ascorbique, la vitamine E, les caroténoïdes et les poly phénols. Le lycopène, caroténoïde qui donne à la tomate sa couleur rougeâtre, est l'un des puissants antioxydants et joue un rôle important dans de nombreuses fonctions biologiques (Weisburger, 1999 ; Levy et Sharoni, 2005).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui porte sur un essai de formulation d'une boisson à base de concentré de tomate, associée d'un jus de citron comme un agent de conservation et un facteur goût de notre boisson en utilisant un plan d'expériences. L'objectif de notre étude est la sélection d'une formule optimale à l'aide d'une évaluation physicochimique et sensorielle des boissons données par notre plan d'expériences.

Pour faciliter la lecture de ce document nous avons choisi d'articuler le travail en six chapitres:

- ✚ Le premier chapitre illustre des généralités sur les tomates en présentant l'historique, les définitions, la composition chimique, la valeur nutritionnelle, l'intérêts médicinales, l'intérêts économique, les bases de culture de ce fruit.
- ✚ Le deuxième chapitre présent une étude bibliographique sur les agrumes particulièrement, le citron à savoir, son historique, sa définition, sa composition biochimique, ses variétés et en fin, sa valeur nutritionnelle.
- ✚ Le troisième chapitre décrit les différents types de jus de fruits et la technologie de fabrication de ce dernier à l'échelle industriel.
- ✚ Le quatrième chapitre illustre des généralités sur la notion plans d'expériences en présentant l'histoire, la terminologie, les types et les logiciels des plans d'expériences.
- ✚ Le cinquième chapitre décrit les différentes techniques de transformation de la tomate ainsi que le matériel et les méthodes utilisées pour les analyses physico-chimiques et sensorielles.
- ✚ Le sixième chapitre illustre les résultats obtenus avec leurs interprétations.
- ✚ Enfin une conclusion générale clôture ce travail.

Chapitre I



Généralités sur la tomate

Chapitre I

Généralités sur la tomate

I- Histoire et origine

L'attrait pour la tomate ne date pas d'hier. Cette caractéristique, associée avec la grande capacité d'adaptation de la tomate, explique sans doute qu'elle soit aujourd'hui présente presque par tout sur la planète (**Michaud. L, 2018**).

La tomate est originaire de la région des Andes en Amérique du Sud. Son centre de domestication reste à l'heure actuelle fortement débattu, et les hypothèses étudiées présentent deux origines probables ; une pré-domestication au Pérou complétée par une domestication complémentaire au Mexique (**Blanca et al, 2015**). La « petite tomate péruvienne » aura migrée à partir de l'Amérique du sud vers le Mexique il ya de ce la plus de 2000 ou 3000 ans, probablement grâce aux oiseaux, aux cours d'eau, aux migrant ou aux vents. (**Michaud. L, 2018**). On trouve ses premières traces de culture par les Aztèques vers 1400. Ils les avaient déjà améliorées par rapport aux formes sauvages (**Bureaux. C, 2013**). Les Aztèques nommaient le plant *xitomatl* qui signifiait « fruit charnu » ou large *tomatl*, en comparaison avec un autre fruit, la tomatille, qui était la véritable *tomatl* (**Michaud. L, 2018**).

Lorsque les conquistadors espagnols ont jeté l'ancre dans la région de Veracruz, au Mexique, au début du XVI^e siècle, ils ne s'attendaient pas à trouver ce que l'ont peut considérer aujourd'hui comme un trésor. Alors qu'ils étaient à la recherche d'or, ils ont plutôt découvert plusieurs nouveaux fruits et légumes dont celui qu'ils ont appelé « tomate » un nom dérivé du mot Aztèque. Ils sont retournés avec des graines de toutes sortes. C'est ainsi que la tomate fut introduite en Europe vers 1523. Les premières plantes furent cultivées dans les jardins de Séville (**Michaud. L, 2018**).

A partir de l'Espagne, la tomate aurait fait son entrée en Italie vers 1540. Les Italiens ont baptisé le fruit *pommo doro*, c'est-à-dire « pomme d'or », en raison de ses reflets orangés. Les espagnols et les Italiens ont donc été les premiers à adopter la tomate comme un aliment. La plus ancienne recette élaborée à base de tomate serait la sauce tomate à l'Espagnole qui date de 1692. Dans le sud d'Europe (Espagne, Portugal, Italie et Provence), on estime à 1000 le nombre de variétés de tomates cultivées au milieu de XVII^e siècle. En France, la tomate à été introduite en Provence vers 1600 (**Michaud. L, 2018**).

En 1554, un herboriste hollandais suggérait que la tomate avait des propriétés aphrodisiaques, ce qui explique des noms tels que « pomme d'amour » en français et *love*

Généralités sur la tomate

apple en anglais. En Grande-Bretagne en 1590, un avis du botaniste John Gerard indiquait que la plante incluant le fruit était vénéneuse. Il mentionnait que son odeur était âcre et déplaisante. Ce n'est finalement qu'à partir du XVIII^e siècle, soit près de 200 ans de son arrivée en Europe, que les préjugés se sont finalement estompés et que l'on s'est mis à cultiver la plante pour son fruit comestible dans le nord de l'Europe (Michaud. L, 2018).

La tomate a fait son entrée en Amérique du nord au début du XIX^e siècle grâce aux colons européens. Le président Thomas Jefferson avait découvert les vertus culinaires de la tomate lors d'un séjour en France à la fin du XVIII^e siècle. Excellent jardinier, il l'a cultivée sur son domaine à son retour en 1806. Comme le montre la *figure 01*. Enfin, le premier semencier américain, Alexandre W. Levingston (considéré comme le père de la tomate moderne) a joué un rôle majeur dans la popularisation de la tomate en créant plusieurs variétés. Au Québec, ce n'est que vers 1850 qu'on a vu apparaître les premières tomates (Michaud. L, 2018).

En Algérie, ce sont les cultivateurs du sud de l'Espagne (*Tomateros*), qui l'ont introduite étant donné les conditions qui lui sont favorables. Sa consommation a commencé dans la région d'Oran en 1905 puis, elle s'étendit vers le centre, notamment au littoral Algérois (Latigui, 1984).

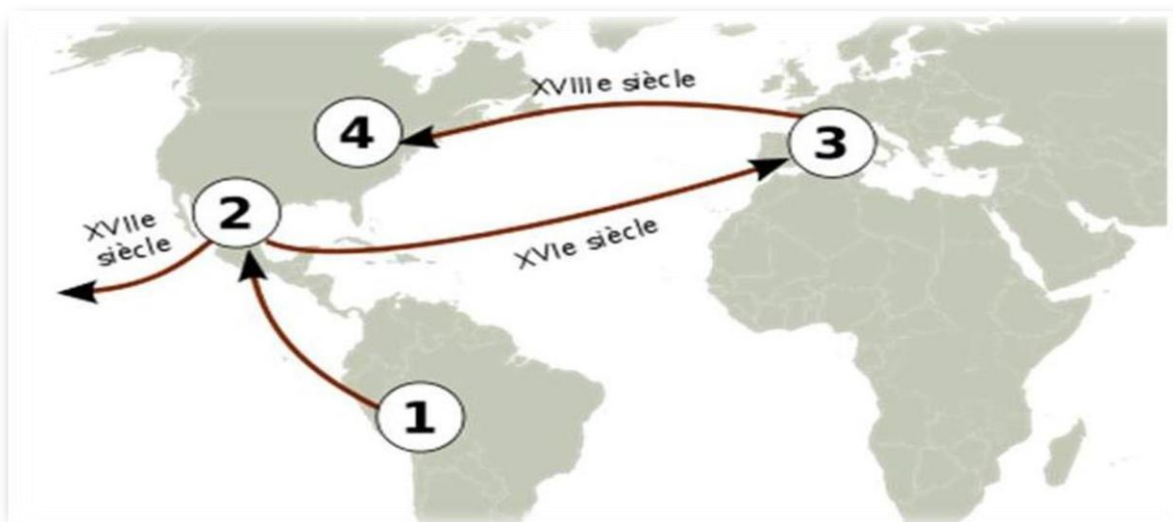


Figure 01 : Diffusion de la tomate dans le monde.

1. Pérou : Centre de diversification.
2. Mexique : Premier centre de domestication.
3. Europe : Deuxième centre de domestication.
4. Etats Unis : Troisième centre de domestication.

Chapitre I

Généralités sur la tomate

II- Définition linguistique de mot « tomate »

Le mot « tomate » désigne à la fois la plante et le fruit charnu. Il est un dérivé de *tomatl* en langue Aztèque. Parce que le mot tomate existe dans de nombreuses langues avec de faibles variations phonétiques et orthographiques, il est souvent considéré comme un mot sans frontières. Ainsi, on utilise tomate non seulement en français, mais également en allemand (*tomaten* au pluriel), en espagnol et en portugais, alors qu'en anglais, on emploie le mot *tomato*. D'autres langues font exception, c'est le cas de l'italien et du polonais qui utilisent respectivement *pomodoro* et *pomidor* (Michaud. L, 2018).

III- Définition botanique de la tomate

La tomate est une plante herbacée annuelle robuste et vigoureuse. Elle est cultivée comme une annuelle dans les régions tempérées, mais dans son climat tropical d'origine, elle est considérée comme une vivace de courte vie.

Au sens botanique, la tomate est un fruit. La partie que l'on consomme correspond en effet à la description d'un fruit, soit : un organe végétale issu de la transformation de l'ovaire d'une fleur après la fécondation.

La tomate fait partie de la famille des *solanacées* au même titre que plusieurs autres plantes légumières telles que le poivron, le piment, la pomme de terre, l'aubergine, la cerise de terre et la tomates. C'est aussi le cas de plantes ornementales comme le pétunia et le datura. Le tabac fait également partie de cette famille.

La tomate appartient au genre *solanum*, le plus imposant de la famille des solanacées et la plupart des variétés de tomate cultivées font partie de l'espèce *lycopersicum*. Ainsi, le nom latin de la majorité des tomates est *solanum lycopersicum* (Michaud. L, 2018).

Au début des années 1700, Linné (Linnæus) a classé les tomates dans le genre *Solanum* en se basant sur leurs caractéristiques visibles. Au milieu des années 1700, Philip Miller, un autre botaniste qui n'était pas d'accord avec le classement de Linné, a classé les tomates dans le genre *Lycopersicon*. Les taxonomistes ont reclassé l'espèce, le remettant dans le genre *Solanum* en se basant sur des informations génétiques. Cette histoire de la classification des tomates montre que les connaissances scientifiques ne sont pas statiques, qu'elles changent constamment lorsqu'on dispose de nouvelles informations. La classification selon Philip Miller est la suivante :

Nom latin : *Solanum Lycopersicon*

Chapitre I

Généralités sur la tomate

Embranchement : *Anthophyta*

Classe : *Dicotylédone*

Ordre : *Solanacées*

Genre : *Lycopersicon*

Espèce : *Lycopersicon esculentum*.

IV- Description botanique du plant de la tomate

La hauteur d'un plant de tomates varie de 30 centimètres pour les plus petits plants de type déterminé, à plusieurs mètres chez les plants de type indéterminé. Les tiges et les feuilles contiennent une huile essentielle qui donne aux plants de tomates leur odeur caractéristique (Michaud. L, 2018). Comme le montre la *figure 02*.

On peut distinguer deux types différents de plantes de tomates, selon le mode de croissance : le type à croissance indéterminée et le type à croissance déterminée (Shankara et al, 2005).

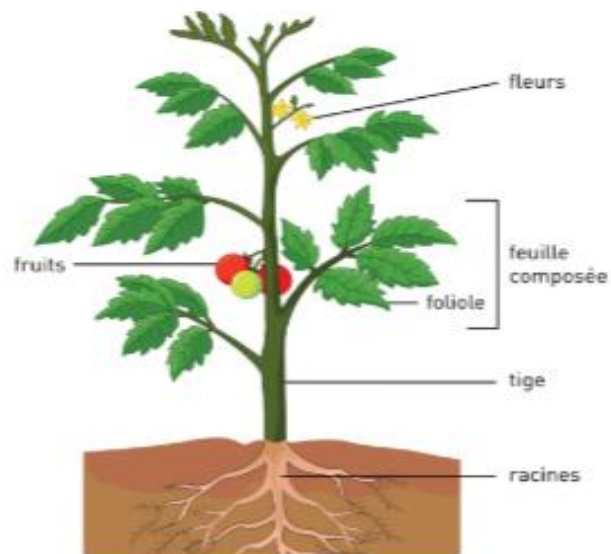


Figure 02 : anatomie de plant de tomates.

1- Racine

Les racines d'un plant de tomates sont abondantes et très ramifiées. Très présente dans les premiers 30 centimètres, les racines peuvent atteindre jusqu'à un mètre dans les sols profonds (Michaud. L, 2018). Comme le montre la *figure 03*.

Généralités sur la tomate



Figure 03 : racines d'un plant de tomates sont concentrées dans les premiers 30 centimètres.

2- Tige

De consistance herbacée en début de croissance, la tige tend à devenir un peu ligneuse en vieillissant. La croissance de la tige est assurée par les bourgeons. Les bourgeons axillaires donnent naissance à des ramifications successives, tandis que les bourgeons terminaux produisent des fleurs ou avortent. Les rameaux issus des bourgeons axillaires produisent des feuilles à chaque nœud et se terminent aussi par une inflorescence (**Chaux et Foury, 1994**). Il n'y a qu'une tige par pied **figure 04** et les ramifications donnent à la plante un aspect buissonnant. Les tiges sont des couleurs vertes pourvues de poils blanchâtres. Elles portent les feuilles, les fleurs et les fruits. Le plus souvent, elles sont retombantes et demandent à être attachées sur des tuteurs (**Shankara et al, 2005**).



Figure 04 : tige de plant de tomates.

3- Feuille

Les feuilles d'un plant de tomates sont composées, c'est-à-dire qu'elles comportent plusieurs folioles. Elles sont poilues, alternes (et non opposées) sur la tige et très odorantes. Leur couleur varie entre le vert et le jaune foncé. Dans la plupart des variétés, les feuilles sont composées de cinq à sept folioles **figure 05**, plus au moins dentelées ou découpées, certaines sont plissées. Leur longueur varie généralement de 10 à 25

Généralités sur la tomate

+*centimètres, mais peut parfois atteindre jusqu'à 50 centimètres. Bien que la majorité des feuilles de tomates soient de type régulier, quelques particularités existent. Certaines variétés présentent des feuilles qui ressemblent à celle de la pomme de terre avec leurs folioles très grandes et peu découpées. D'autres comportent un feuillage délicat et finement divisé (Michaud. L, 2018).



Figure 05 : feuilles d'un plant de tomates.

4- Fleurs

Les fleurs sont réunies en cymes, inflorescences de type déterminé (*figure 06*) ; cependant chez la tomate le méristème de l'inflorescence ne se termine pas par une fleur et, en fait, maintient son indétermination (Welty et al, 2007).

La grappe florale de la tomate se compose d'une succession d'aisselles portant chacune une seule fleur, la tige principale de la grappe (pédoncule) peut se ramifier une ou plusieurs fois (Chaux et Foury1994).

Les fleurs sont disposées de façon opposée sur la grappe où elles prennent naissance. Une fleur termine le bouquet dans son axe (Danneyrolles, 1999).

La fleur est hermaphrodite. Les étamines sont soudées les unes aux autres pour former un cône pollinique qui se referme autour de l'organe femelle situé en son centre. Seule une petite ouverture à son extrémité (le stigmate) permet au pollen des autres fleurs de pénétrer dans le pistil. L'ovaire est supère (situé au-dessus de calice) et comporte le plus souvent 2 loges, ou carpelles, mais certaines variétés peuvent en comporter 3 ou 5. *Figure 06* (Polese .2007).

Généralités sur la tomate

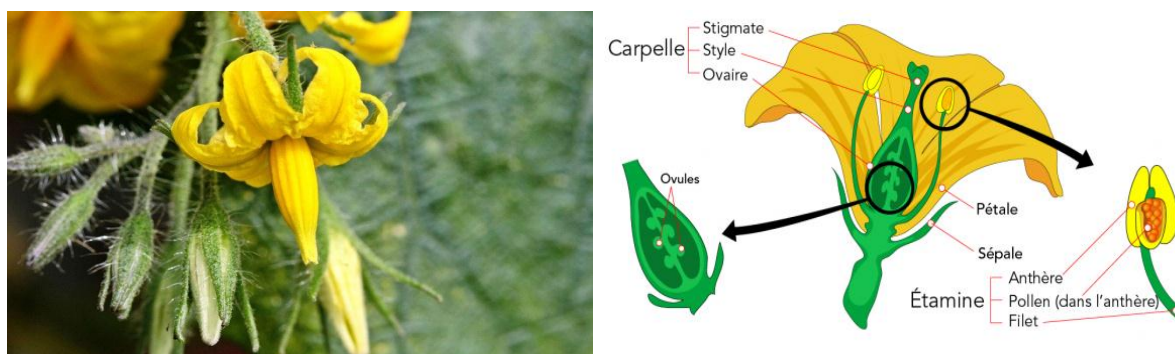


Figure 06 : anatomie d'une fleur de tomate.

5- fruit ; la tomate

Le fruit est une baie charnue, de forme globulaire ou aplatie avec un diamètre de 2 à 15 cm. *Figure 07*. Lorsqu'il n'est pas encore mûr, le fruit est vert et poilu. La couleur des fruits mûrs varie du jaune au rouge en passant par l'orange. En général les fruits sont ronds et réguliers ou côtelés (Shankara et al, 2005).

Si les fruits sont traditionnellement sphériques et rouges, ils peuvent être de diverses tailles, couleurs et formes. Il existe ainsi des fruits blancs, jaunes, orange, ou noirs violacés (Polese .2007).

La tomate est une baie qui peut être de forme, de couleur et de taille très différente suivant les variétés. Elle est constituée de plusieurs loges contenant les graines rattachées au placenta. La partie charnue, appelée péricarpe, provient de la différenciation des parois de l'ovaire de la fleur. Elle est divisée en trois parties : le péricarpe externe, le péricarpe radial et le péricarpe interne appelé columelle. Dans le péricarpe externe, on distingue l'exocarpe membrane externe de la tomate ou peau, l'endocarpe membrane interne qui délimite les loges et le mésocarpe charnu constitué de plusieurs couches de cellules *figure 07*. Le placenta s'étend dans les locules et entoure les graines, celui-ci est ferme et compact dans les fruits immatures. À maturité, ses tissus se séparent formant le tissu loculaire gélatineux et homogène plus communément connu sous le nom de gel. Ce gel finit par remplir toute la cavité loculaire. (Chaïb, 2007).

Généralités sur la tomate

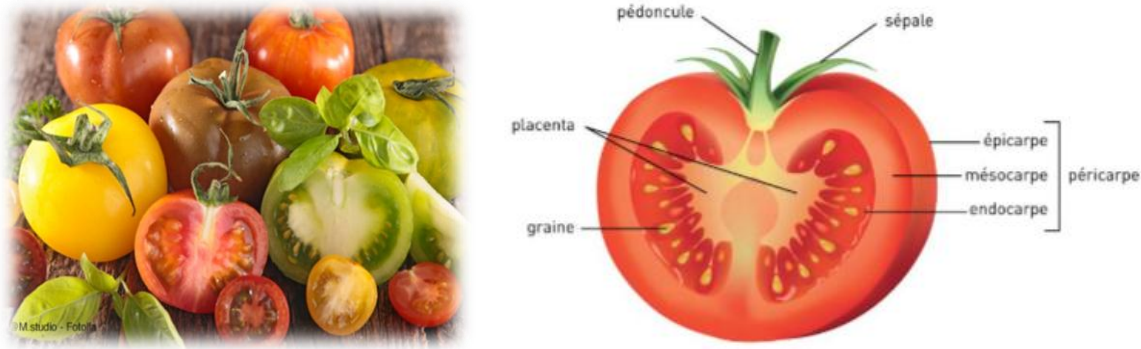


Figure 07 : anatomie du fruit du plant de tomates (la tomate).

6- Grains

Les pépins sont entourés d'une sorte de mucilage provenant de la gélification de l'enveloppe de la graine (**Polese .2007**). Les graines sont nombreuses, en forme de rein ou de poire. Elles sont poilues, beiges, 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'albumen. 1000 graines pèsent approximativement 2,5 à 3,5 g (**Shankara et al, 2005**).

V- Variétés et formes de tomates

La sélection faite par les hommes a privilégié les plantes à gros fruits. On distingue cependant plusieurs catégories de tomates selon les caractéristiques qui les font différencier à savoir:

- Le type de croissance : déterminé ou indéterminé.
- La longueur du cycle.
- La période de la culture : saison chaude et humide, saison froide, toute l'année.
- Les caractéristiques des feuilles : (Forme, Couleur, Pilosité,...).
- Les caractères des fruits : (Forme, Grosseur, couleur,...).
- Utilisation : industriel, frais **Beecher, G-R., (1998)**.

Il existe plusieurs milliers de variétés cultivées de tomates, mais il existe des variétés fixes et d'autres hybrides **Beecher, G-R., (1998)**. Tous les tomates (y compris celle que l'on appelle « ancienne ») sont issues de croisement et d'amélioration pour donner les variétés d'aujourd'hui :

Généralités sur la tomate

- **Variétés fixées** : comme leur nom l'indique, le croisement dont elles sont issues a permis de conserver de manière stable leurs caractéristiques (vigueur, forme, couleur, goût...).
- **Variétés hybrides F1** : la variété est issue du résultat de croisement de deux variétés de lignées pures. Cette variété de première génération bénéficie du patrimoine de ses deux parents, avec un effet de vigueur supplémentaire.

Il existe quatre grandes familles classées suivant la taille de leur fruits : les tomates à gros fruit (100g et plus), les tomates cocktail à fruits moyens (entre 30g et 50g), les tomates cerises à petit fruits (15g à 20g) et enfin les tomates groseilles à très petits fruits (moins de 15g). On dénombre huit formes principales de fruit **figure 08 (Bureaux. C, 2013)**.

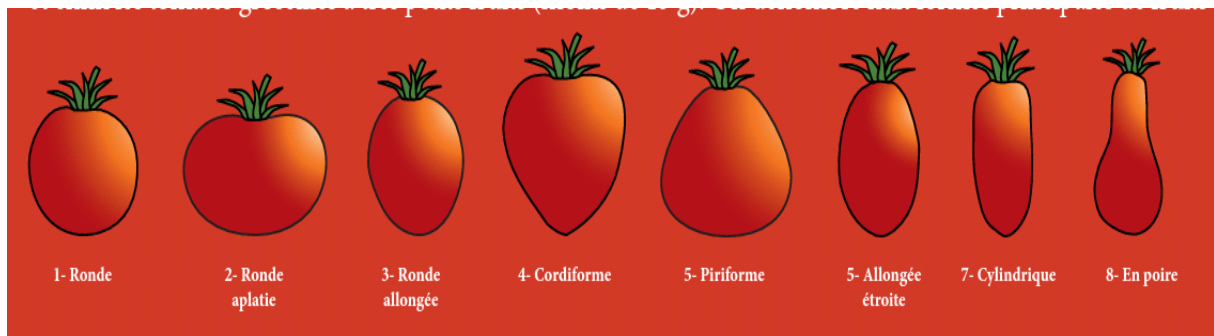


Figure 08 : différentes formes de la tomate.

Toutes les variétés ne sont pas inscrites au catalogue officiel des semences, nous en avons sélectionné quelques-unes **figure 09. (Polese .2007)**.

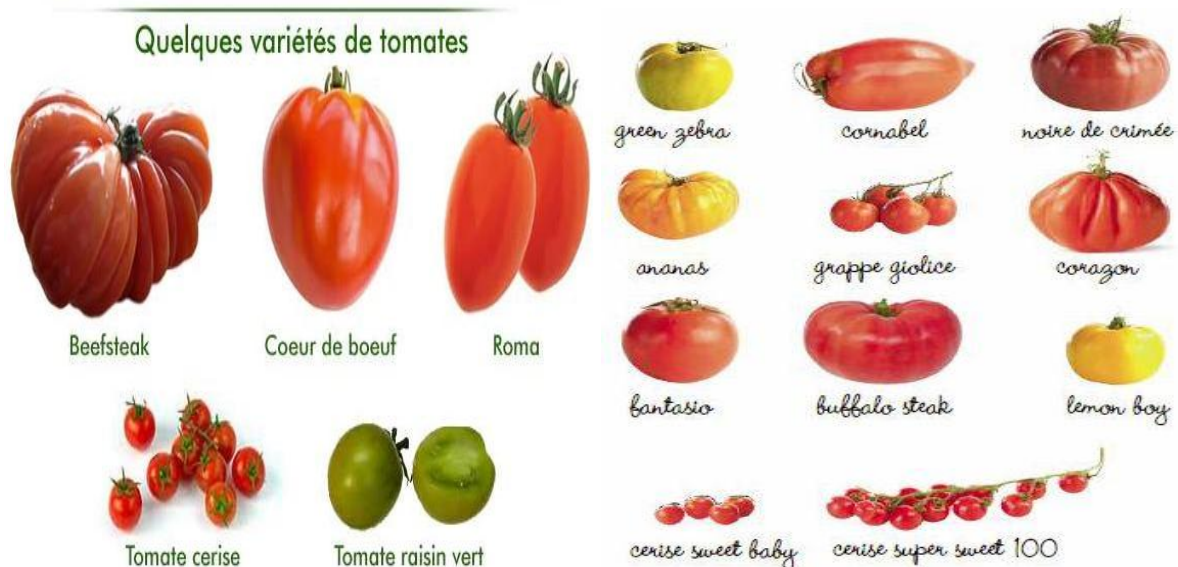


Figure 09 : quelques variétés de tomates.

Généralités sur la tomate

En Algérie on trouve deux variétés fixes: La tomate Marmande et la tomate saint pierre.

Figure 10.

- **Célèbre tomate Marmande** : Est une variété assez précoce, vigoureuse et productive, fruits de 150 à 250 g, chair ferme, sucrée, parfumée, de bonne qualité. En salade, à farcir, en gratin, sauce... etc
- **Tomate saint- pierre** : Est une variété vigoureuse, demi-précoce, à gros fruits rouge vif, ronds et lisses, peu de graines, variété hâtive (**Gautier. H et al, 2009**).



Tomate Marmande



tomate saint- pierre

Figure 10 : variétés de tomates qui se trouvent en Algérie.

VI- Types de la tomate

1- Tomate de table

Elles sont grosses, elles sont moins rouges que les tomates industrielles, elles contiennent beaucoup de pépins et d'eau, leur peau est peu résistante. Elles sont utilisées pour la salade ou transformées en purée pour sauce.

Leur rendement à l'hectare est faible comparé à la tomate industrielle ; elles ne peuvent donc pas faire l'objet d'une transformation industrielle (**Mtcthg, 2009**); (**Sadok, 2019**).

2- Tomate industrielle :

De dimensions souvent plus petites et parfois allongées, aspect très rouge désiré pour les sauces, elles ont un taux de matières sèches plus élevées aussi elles ont une peau résistante.

Ce sont ces tomates qui se prêtent à une transformation industrielle comme leur nom l'indique.

Or les variétés produites (tomates de tables) ne répondent pas du tout aux techniques actuelles de conservation ou de transformation. Il faut résoudre un premier problème qui est agronomique en changeant de variétés de tomates.

Généralités sur la tomate

Les avantages sont évidents :

- Meilleur rendement pour la culture
- Possibilité de transformer la production (*Mtcthg, 2009*); (*Sadok, 2019*).

VII- composition chimique de la tomate

La composition de la matière sèche chez la tomate mûre d'après **Davies et Hobson (1981)**. Les pourcentages sont calculés en masse. La tomate est majoritairement constituée d'eau (de 90 à 95%), les 5 à 10% restant correspondent à la matière sèche qui est déterminante dans l'élaboration de la qualité organoleptique et nutritionnelle du fruit. Ainsi, chez la tomate, la matière sèche est constituée pour moitié de sucres, de 13% d'acides et d'environ 20% de composés pariétaux (pectine, hémicellulose) déterminant le goût et la texture du fruit. Parmi les composés d'intérêt nutritionnel, les minéraux représentent 8% de la matière sèche et les vitamines, pigments et poly phénols environ 2%. **Figure 11**.

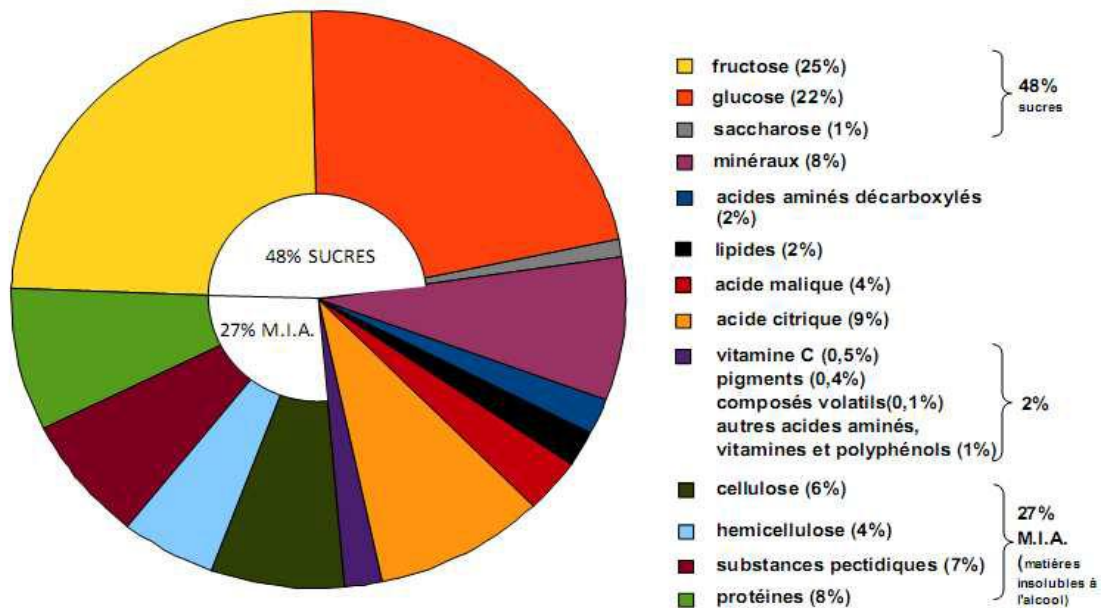


Figure 11 : composition chimique de la matière sèche de la tomate.

La composition biochimique des fruits de tomate fraîche dépend de plusieurs facteurs, à savoir : la variété, l'état de maturation, la lumière, la température, la saison, le sol, l'irrigation et les pratiques culturales.

Une tomate mure est composée d'environ 90 % d'eau soit 5 à 10 % de matière sèche environ la moitié de la matière sèche est composée de sucres (glucose et fructose

Chapitre I

Généralités sur la tomate

essentiellement), un quart d'acides organiques, d'acides aminés, de minéraux et des lipides, et un quart de protéines, pectines, cellulose et hémicellulose.

Ce produit est un aliment très riche en eau et très pauvre en calories (18kcal pour 100 grammes), riche en éléments minéraux et en vitamines (A, C et E). Ses antioxydants en font un formidable rempart contre les infections. (*Mehallal, 2013*).

Une grande diversité de composés phénoliques a été identifiée dans la tomate. Ce sont principalement des acides hydroxycinnamiques, des flavonols et des flavanones, presque tous sous forme glycosylée (*slimestad. R et al, 2008*).

Le caroténoïde retrouvé majoritairement chez les tomates rouges est le (*E*)-lycopène qui constitue leur principal pigment. Le lycopène sous ses formes *Z* peut également être retrouvé dans de faibles proportions dans ces tomates (*Ben-Aziz. A et al, 1973*). La tomate est reconnue pour sa richesse en vitamine C (forme réduite et oxydée). Par ailleurs, ce fruit contient aussi des vitamines A, B, K et E. Parmi les vitamines B, sont principalement retrouvées la thiamine (B1), la riboflavine (B2), la niacine (B3), l'acide panthoténique (B5), la vitamine B6 et les folates (B9), dont les teneurs données par les tables de composition USDA sont présentées dans le *tableau 01*. Ce sont essentiellement les vitamines C et E qui ont été étudiées dans les fruits de tomate.

Tableau 01 ; teneurs des constituants majoritaires de la tomate (pour 100g de produit frais).
Source: Tables de composition (USDA USDA/CNPP, 2007).

Composés	Teneurs
Eau (%)	94.50
Energie (Kcal)	18
Protéines (g)	0.88
Lipides (g)	0.20
Centres (g)	0.50
Carbohydrates (g)	3.92
Fibres (g)	1.20
Sucre (g)	2.63
Glucose (g)	1.25
Fructose (g)	1.37
Minéraux	/

Chapitre I

Généralités sur la tomate

Calcium (mg)	10
Fer (mg)	0.27
Magnésium (mg)	11
Phosphore (mg)	24
Potassium (mg)	237
Sodium (mg)	5
Zinc (mg)	0.17
Cuivre (mg)	0.059
Manganèse (mg)	0.114
Lipides	/
Acides gras saturés (g)	0.045
C16 :0 (g)	0.033
C18 :0 (g)	0.013
Acides gras mono insaturés (g)	0.050
C16 :1 (g)	0.002
C18 :1 (g)	0.049
Acides gras polyinsaturés (g)	0.135
C16 :2 (g)	0.130
C18 :2 (g)	0.005
Polytosterols (mg)	7
Acides aminés	/
Tryptophane (g)	0.006
Thréonine (g)	0.021
Isoleucine (g)	0.020
Leucine (g)	0.031
Lysine (g)	0.031
Méthionine (g)	0.007
Cystine (g)	0.011
Phénylalanine (g)	0.022
Tyrosine (g)	0.015
Valine (g)	0.022
Arginine (g)	0.021

Chapitre I

Généralités sur la tomate

Histidine (g)	0.013
Alanine (g)	0.024
Acide aspartique (g)	0.118
Acide glutamique (g)	0.313
Glycine (g)	0.021
Proline (g)	0.016
Sérine (g)	0.023
Vitamines	/
Vitamine C (mg)	12.7
Thiamine (µg)	37
Riboflavine (µg)	19
Niacine (mg)	0.594
Acide pantothénique (µg)	89
Vitamine B6 (µg)	80
Folates (µg)	15
Vitamine A (µg)	42
α-tocophérol (mg)	0.54
γ-tocophérol (mg)	0.12
Vitamine K (µg)	7.9
Caroténoïdes :	/
α-Carotène (µg)	101
β-Carotène (µg)	449
Lycopène (µg)	2573
Lutéine + Zéaxanthine (µg)	123

VIII- Intérêts de la tomate

1- Intérêts économique

La tomate est, après la pomme de terre, le légume le plus consommé dans le monde, soit frais soit transformée.

Au niveau mondial

Généralités sur la tomate

La culture de la tomate est très répandue dans le monde entier mais 90% de la production mondiale est obtenue dans l'hémisphère nord (bassin méditerranéen, Californie et Chine) *figure 12*. En effet, près de cinq millions d'hectares (4,98 millions ha) sont réservés annuellement à cette culture avec une production d'environ 159 millions de tonnes de tomates ont été produites dans le monde; et un rendement moyen de 28,3 tonnes à l'hectare (*Fao Stat, 2013*).

✚ En Algérie

La production nationale de la tomate fraîche s'est établie à 13,72 millions de quintaux (qx) durant la campagne 2017-2018, a indiqué le ministère de l'Agriculture, du développement rural et de la pêche dans un communiqué. Le rendement a été de 428 qx/hectare pour la tomate plein champ et 1,225 qx/hectare pour la tomate sous serre, a précisé la même source.

Les plus grandes wilayas productrices de la tomate fraîche sont Biskra avec une production de 2,33 millions de qx, Mostaganem avec une production de 1,33 million de qx, Tipaza avec 1,04 million de qx et Ain Defla avec 728,250 qx. Outre la tomate fraîche, la production de la tomate industrielle (destinée à la transformation), elle a été de 15,4 millions de qx durant la campagne 2017-2018, avec un rendement de 651 qx/hectare. *Figure 12*

Les plus grandes wilayas productrices de la tomate industrielle sont Skikda avec une production de 4,65 millions de qx, Tarf avec 3,5 millions de qx, Guelma avec 2,06 millions de qx et Ain Defla avec 1,68 million de qx (*Fao Stat, 2013*).



Figure 12 : principaux pays producteurs de la tomate (million de tonnes).

2- Importance nutritionnelles

La tomate largement consommée, joue un rôle bénéfique dans notre alimentation. Contrairement à la plupart des fruits, c'est un aliment très peu énergétique, car prise crue, elle n'apporte qu'environ 15 kcal/100 g et 20 kcal/100 g à l'état cuit. La tomate comme la plupart des légumes, présente une bonne densité nutritionnelle avec : 94% d'eau et 6% de matière

Généralités sur la tomate

sèche composée de 50% de sucres (fructose et glucose), 25% d'acides organiques (acides citriques et maliques), 8% de minéraux, 2% d'acides aminés. Elle est très riche en carotène et lycopène qui lui donne sa couleur rouge, cet antioxydant diminuerait le risque de maladies cardiaques et de certaines formes de cancer, dont celui de la prostate.

La tomate est un aliment équilibré, riche en éléments minéraux et en vitamines (A, C et E). Les glucides sont constitués principalement de fructose et de glucose. Les sels minéraux, dont la teneur dépend aussi du sol et des apports d'engrais, sont composés pour près de la moitié de potassium, environ 235 mg pour 100 g de tomate. La tomate contient plusieurs vitamines hydrosolubles dont le principal est la vitamine C. La teneur de 10 à 30 mg/100 g dans la tomate crue est fortement réduite dans la tomate cuite (environ 16 mg) (**Bedad, 2018**).

Les sels minéraux les substances organiques et les composantes de tomate crue sont indiqués successivement dans le *tableau 01*.

3- Intérêts médicaux

La tomate aurait un usage traditionnel de phytothérapie notamment grâce à sa teneur en pigments caroténoïdes antioxydants, et plus particulièrement en lycopène, réputé pour ses propriétés anticancéreuses et de prévention contre les maladies cardiovasculaires, en particulier. Il est à noter que ce lycopène est plus facilement assimilé par la consommation de tomates cuites, la cuisson libérant les nutriments en faisant éclater les cellules végétales (**Fao Sat, 2013**); (**Yousfi, 2018**).

Cancer

Certaines études publiées sur United States National Library of Medicine ont révélées que la consommation fréquente ou régulière de la tomate pourrait réduire le risque de développer le cancer de la prostate, aussi bien 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 (**Fao Sat, 2013**); (**Yousfi, 2018**).

Maladies cardiovasculaires

Une autre étude menée chez des femmes a démontré que ce même fruit pourrait réduire leurs risques de souffrir des maladies cardiovasculaires et baisser le taux de leurs lipoprotéines de basse densité. Les chercheurs pensent que ces effets bénéfiques pourraient être dus au lycopène associé à d'autres composés antioxydants et des vitamines (**Fao Sat, 2013**); (**Yousfi, 2018**).

Généralités sur la tomate

IX- Culture des tomates

1- Conditions nécessaires pour une bonne culture

a- Température et lumière

La tomate demande un climat relativement frais et sec pour fournir une récolte abondante et de qualité. Cependant, la plante s'est adaptée à une grande diversité de conditions climatiques, allant du climat tempéré vers le climat tropical chaud et humide. La température optimale pour la plupart des variétés se situe entre 21 et 24°C. Les plantes peuvent surmonter un certain intervalle de températures, mais en-dessous de 10°C et au-dessus de 38°C les tissus des plantes seront endommagés. La tomate réagit aux variations de température qui ont lieu pendant le cycle de croissance **tableau 02**. Pour donner quelques exemples, cela affecte la germination des graines, la croissance des semis, la floraison, la mise à fruits ainsi que la qualité des fruits. Lorsque des périodes de froid ou de chaleur perdurent pendant la floraison, la production de pollen sera réduite. Ceci affectera la formation des fruits. Le gel tue les pieds de tomate. Pour éviter des dommages de gel, il est prudent d'attendre la fin définitive de l'hiver avant de semer. Si l'on sème à l'intérieur, il est possible de le faire plus tôt (dans des pots ou des caissettes). L'intensité de la lumière affecte la couleur des feuilles, la mise à fruits et la couleur des fruits (**Shankara et al, 2005**).

Tableau 02 : températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate.

Phases	Température (C°)		
	Min	Opte	Max
Germination des graines	11	16-29	34
Croissance des semis	18	21-24	32
Mise à fruit	18	20-24	30
Développement de la couleur rouge	10	20-24	30

b- Eau et humidité

Une simple astuce permet de déterminer si les réserves en eau disponibles sont suffisantes pour cultiver la tomate. Si des plantes herbacées (des plantes avec de nombreuses feuilles fines) poussent dans le milieu naturel, il sera possible d'y faire pousser des tomates. Il faut

Généralités sur la tomate

pouvoir compter sur au moins trois mois de pluie. Le stress causé par une carence en eau et les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs et provoque le fendillement des fruits. Par contre, lorsque les averses sont très intenses et l'humidité est très élevée, la croissance des moisissures et la pourriture des fruits seront plus importants. Les temps nuageux ralentissent le mûrissage des tomates. Cependant, des cultivars adaptés sont disponibles. Les sociétés semencières ont des variétés de tomates spécialement adaptées aux climats chauds et humides (**Shankara et al, 2005**).

Un taux d'humidité élevé peut causer des problèmes dans les serres car il favorise l'établissement de nombreux champignons et bactéries pathogènes. Cependant, un taux d'humidité trop faible à cause de l'arrivée d'air froid et sec dans la serre en hiver stressera encore plus les plants. L'humidité atmosphérique doit être de 76% lors de la germination, 75-80% durant l'élevage des plantes, 70-80% lors du développement des fruits (**Hamidouche et al, 2013**).

c- sol

La tomate pousse bien sur la plupart des sols minéraux qui ont une bonne capacité de rétention de l'eau, une bonne aération et qui sont libres de sels. Elle préfère les terres limoneuses profondes et bien drainées. La couche superficielle du terrain doit être perméable. Une profondeur de sol de 15 à 20 cm est favorable à la bonne croissance d'une culture saine. Dans les sols d'argile lourde, un labourage profond permettra une meilleure pénétration des racines.

La tomate tolère modérément un large intervalle de valeurs du pH (niveau d'acidité), mais pousse le mieux dans des sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8 et où l'approvisionnement en éléments nutritifs est adéquat et suffisant. En général, ajouter de la matière organique stimule une bonne croissance. Les sols qui contiennent beaucoup de matière organique, comme les sols tourbeux, sont moins appropriés dû à leur forte capacité de rétention d'eau et à une insuffisance au niveau des éléments nutritifs (**Shankara et al, 2005**).

2- choix d'une variété

La variété qu'il faut choisir dépend des circonstances locales ainsi que du but visé par la culture. L'on peut distinguer les variétés locales (races locales non améliorées) et les variétés améliorées (ou commerciales). Ces dernières résultent d'un processus continu de sélection de plantes. Les critères de sélection sont basés sur des caractéristiques telles que le type de fruit,

Généralités sur la tomate

la forme de la plante, la vitalité et la résistance aux ravageurs et aux maladies, mais également sur des facteurs liés au climat et à la gestion. Les agriculteurs/trices ont toujours sélectionné les variétés qui donnaient le mieux sous les conditions locales. Il ne faut sélectionner que les fruits des plantes les plus performantes et garder les pépins issus de ces derniers pour les utiliser comme graines au cours de la saison suivante. Les agriculteurs/trices peuvent produire leurs propres cultivars, mais il s'agit là d'un processus coûteux qui comporte des risques.

Les sociétés d'amélioration des tomates ont produit ce que l'on appelle les hybrides F1. Ce sont des plantes issues de graines qui ont été multipliées par le biais d'une pollinisation manuelle et où les lignées mâle et femelle des parents sont contrôlées. Ces hybrides combinent les caractéristiques de haut rendement, bonne résistance contre les maladies ainsi que d'autres qualités spécifiques par rapport à la plante et aux fruits. (Shankara et al, 2005).

3- Préparation et plantation

a- Préparation de sol

Il est nécessaire de labourer (ou de bêcher) afin de préparer la terre pour une nouvelle culture. Dans les régions où l'eau est un facteur contraignant, le labour améliore également la conservation de l'eau. Un labourage effectué après la récolte de la culture précédente améliore la structure du sol ainsi que sa capacité de rétention de l'eau. Cela permet également de réduire les risques de contamination par des ravageurs et des maladies liés au sol car l'exposition de la terre au soleil ardent peut éliminer ces derniers. Il faut effectuer un labourage en profondeur pour casser la couche dure du sous-sol qui est imperméable (la semelle de labour) *figure 13*, pour éliminer les mauvaises herbes et pour ameublir le sol. Cette pratique bénéficie également à la croissance des racines. Il est souvent nécessaire de herser à deux reprises pour bien niveler le terrain, casser les mottes et éliminer les résidus de culture de la campagne précédente (Shankara et al, 2005).



Figure 13 : labourage de sol avant la culture.

Généralités sur la tomate

b- Semis et préparation des pépinières

En général l'on repique les tomates car l'on obtient de bien meilleurs résultats lorsque les semis sont levés en pépinière. Il existe deux méthodes pour faire lever les semis en pépinière :

-Semer sur un lit de semis

-Semer dans une caissette à semis (pratiqué par de nombreux agriculteurs/trices en Asie du Sud-est) *figure 14*.

En pépinière, il faut moins de graines pour produire le nombre de pieds souhaités. L'on peut y sélectionner les plantules en fonction de leur taux de croissance et de leur état de santé avant de les repiquer sur le terrain. L'on pourra y protéger convenablement les plantules. Par ailleurs, la distance de plantation est plus régulière en cas de repiquage qu'en cas d'ensemencement direct sur le terrain.

Le lit de semis doit mesurer entre 60 et 120 cm de large et avoir une hauteur de 20 à 25 cm. La longueur de la planche dépendra du nombre de plantules souhaité. Il faut éliminer les mottes et les chaumes. Ajoutez du fumier de ferme bien décomposé ainsi que du sable fin. Il faut bien ameublir le sol. Afin d'élever un nombre suffisant de semis pour planter un hectare de tomates, il faudra semer entre 150 et 200 g de graines sur 250 m² de lit de semis.

Sur la longueur du lit de semis, dessinez des lignes espacées de 10 à 15 cm. Semez les graines à petits intervalles le long de ces lignes et appuyez doucement. Recouvrez les graines de sable fin et de paille. Arrosez les lits de semis deux fois par jour afin d'assurer que le degré d'humidité soit suffisant pour la germination. Après la germination, il faudra enlever la paille. (Shankara et al, 2005).



Figure 14 : lit et caissettes à semis.

c- Repiquage

Le repiquage des plantules sur le terrain a lieu entre 3 et 6 semaines après l'ensemencement. Une semaine avant le repiquage, il faudra sevrer les plantules en réduisant l'arrosage, mais 12 à 14 heures avant de les enlever du lit de semis il faudra les arroser

Généralités sur la tomate

copieusement pour éviter les dommages excessifs aux racines lorsqu'on les déterre. Les plantules de 15 à 25 cm de haut qui ont entre 3 et 5 feuilles réelles sont les plus appropriées pour le repiquage. Ce travail ne devrait être effectué que pendant l'après-midi ou pendant un jour nuageux afin de réduire le choc de transplantation, et il sera nécessaire d'arroser immédiatement. Au moment de déterrer les semis, faites de sorte qu'une grande motte de terre reste attachée aux racines pour éviter que celles-ci ne soient abîmées. L'espacement entre les plantes et entre les lignes dépendra du cultivar, du port de croissance, du type de sol, du système de culture et également de la question si les plantes seront tuteurées ou si elles seront laissées prostrées sur le sol *tableau 03*. Dans le cas où les tomates seront tuteurées avec des perches, la distance entre les lignes pourra être réduite à 20 ou 40 cm (**Shankara et al, 2005**).

Tableau 03 : espacement de plantation pour les trois types (selon le mode de croissance) de plantes de tomates.

Mode de croissance	Distance entre les lignes et les plantes
Déterminé	1.0 x 0.5 m
Semi-déterminé	0.75 x 0.5m
Indéterminé	0.75 0.5m

4- Pratiques de culture

a- Usages des fumiers et des fertilisants

Afin d'obtenir des rendements élevés, les tomates ont besoin de fertilisants. Il existe deux groupes de produits qui permettent d'apporter des éléments nutritifs : les fumiers organiques, et les fertilisants chimiques.

Les fumiers de ferme les plus courants sont les fumiers de cheval, de vache et de porc. Parmi ces trois sortes de fumier, celui qui provient du cheval a la teneur en éléments nutritifs la plus équilibrée. Le fumier de vache contient relativement peu de phosphate. Le fumier de porc est généralement riche en sels minéraux mais contient relativement peu de potassium. Le fumier des chèvres et des moutons constitue également du bon fumier organique.

L'utilisation du fumier de ferme est plus appropriée pour les sols sablonneux que pour les sols argileux, parce que c'est assez collant. Les sols sablonneux s'effriteront moins facilement lorsque l'on y ajoute du fumier, c'est pourquoi cela leur permettra de retenir davantage d'eau.

Généralités sur la tomate

Les fertilisants chimiques (à l'exception du calcium) n'améliorent pas la structure du sol mais ils enrichissent le sol en y apportant des éléments nutritifs. Les fertilisants chimiques sont relativement coûteux, mais dans certaines régions ils sont moins chers que le fumier par rapport à la quantité d'éléments nutritifs apportés (Shankara et al, 2005).

b- Arrosage

La tomate n'est pas résistante à l'aridité. Le rendement diminue considérablement après de courtes périodes de carence en eau. Il est important d'arroser régulièrement les plantes, surtout pendant les périodes de floraison et de formation des fruits. La quantité d'eau nécessaire dépend du type de sol et des conditions météorologiques (précipitation, humidité et température). Sur les sols sablonneux, il est particulièrement important d'arroser régulièrement (par ex. 3 fois par semaine). Dans de bonnes conditions, un arrosage par semaine devrait suffire. Il existe différentes méthodes d'irrigation : irrigation de surface, irrigation par aspersion et irrigation par égouttement (Shankara et al, 2005).

c- Taille

Il est important de tailler les tomates, surtout pour les variétés qui forment un buisson dense et pour les variétés à croissance indéterminée. La taille permet d'améliorer l'interception de la lumière ainsi que la circulation de l'air. La taille des gourmands (l'ébourgeonnage) et des extrémités des tiges (l'écimage) se fait par pinçage *figure 15*. La mesure dans laquelle il est nécessaire de tailler les pieds de tomate dépend du type de plante ainsi que de la taille et de la qualité des fruits (lorsque les plantes ne sont pas taillées, elles pousseront au hasard et les fruits seront plus petits) (Shankara et al, 2005).

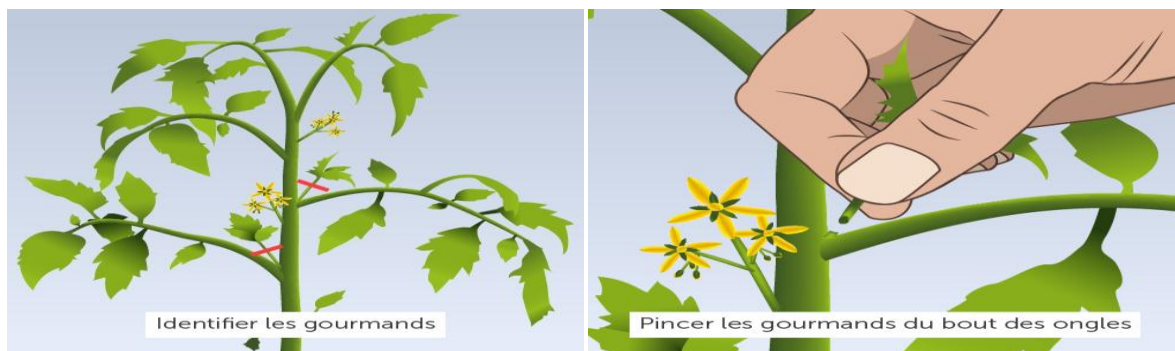


Figure 15 : pinçage des gourmands de la plante de tomate.

d- Systèmes de tuteurage

Des perches en bambou, des échelas en bois, ou d'autres tuteurs ou treillis formés de matériaux solides peuvent servir d'appui aux plantes et permettent de maintenir les fruits et les feuilles au-dessus du sol *figure 16*. Le tuteurage augmentera le nombre ainsi que la taille

Généralités sur la tomate

des fruits que donnera la plante. En outre, cela réduira le taux de pourriture des fruits et facilitera le traitement ainsi que la récolte. Il faut tuteurer les variétés à croissance indéterminée pour faciliter la taille, le pincage, la récolte ainsi que d'autres pratiques de culture. Il faut tuteurer les variétés à croissance déterminée pendant la saison humide afin d'éviter que les fruits entrent en contact avec le sol (**Shankara et al, 2005**).



Figure 16 : tuteurage des plantes de tomates.

e- Protection des plantes

Les hommes ont toujours protégé leurs cultures des effets climatiques défavorables. Des buissons et des murs protègent contre le vent, des feuilles et des lamelles contre le soleil intense ainsi que la pluie, le verre et le plastique contre le froid. Traditionnellement, l'on utilisait le verre dans les serres pour faire entrer la lumière du soleil *figure 17*, mais la découverte d'un film transparent synthétique fut une innovation incroyable. Elle a permis de réduire considérablement les frais de construction d'une serre (**Shankara et al, 2005**).



Figure 17 : serres à tomates.

Généralités sur la tomate

X- Pathologies et ravageurs de la tomate

1- Pathologies physiologiques

Elles sont nombreuses et peuvent concerner les racines, le collet, la tige, le feuillage, aussi bien que les fruits. Elles sont généralement provoquées par des carences au niveau des éléments nutritifs et par des conditions climatiques défavorables et parmi les plus répandues on note :

- La pourriture apicale, provoquée par une carence en calcium;
- La fissuration des fruits suite à de grandes fluctuations dans la teneur en humidité du sol ou de la température;
- L'asphyxie racinaire, causée par des irrigations trop abondantes ou des pluies excessives;
- La tige boursouflée, suite à une alimentation azotée excessive;
- L'altération des fruits, due aux coups de soleil ou à des fentes de croissance.

(Toufouti, 2013).

✚ Pourritures apicales :

Ce sont des nécroses qui apparaissent toujours à la base des fruits. Au début, le détriment se présente comme une tache imbibée d'eau qui s'élargit et devient brun sombre. Cette surface brune molle se transforme en pourriture molle lorsque celle-ci est prise par les bactéries et les champignons. Au niveau physiologique, ces blessures peuvent être expliquées par une déficience d'absorption du calcium par la plante et aussi par une irrigation irrégulière. (Biekre, 2013).

✚ Craquages des fruits

Ils peuvent être radiales ou concentriques (circulaires) et apparaissent la plupart du temps dans la partie apicale (près du pédoncule floral) du fruit. Ces craquelures plus ou moins profondes, sont dues aux pluies abondantes et aux fluctuations importantes de température. (Biekre, 2013).

2- Pathologies fongiques ou cryptogamiques

Ce sont des maladies causées par des champignons. Les plus connues et les plus dommageables en zone tropicale sont : l'alternariose, la fusariose, la cladosporiose, la septoriose, la verticilliose, la stemphylliose et le mildiou. On observe aussi des maladies au stade pépinière, tels que les fontes de semis qui cause de nombreux morts de plantules. Ces détriments sont plus importants en période chaude et humide. La lutte recommandée est

Généralités sur la tomate

l'utilisation de grains traités à base de produit fongicide (manèbe, zinèbe, ou sulfate de zinc). En outre, il est conseillé de désinfecter le sol avec un désinfectant chimique ou un traitement à la vapeur. (*Blancards, 1991*) (*Blancards, 2009*).

3- Pathologies bactériennes

De nombreuses bactéries peuvent attaquer les racines des plantes de tomate en Côte d'Ivoire. L'espèce la plus connue est *Ralstonia solanacearum*. Cette dernière, fréquente chez les *solanacées*, est responsable du flétrissement bactérien qui est un facteur limitant de la production de tomate sous les tropiques. La maladie se manifeste par un flétrissement général de la plante dû à l'obstruction des canaux conducteur de sève depuis les racines. La fanaison commence par les feuilles et au bout de 4 à 6 h, la plante entière est flétrie à cause de la vitesse de multiplication des bactéries (*Soro, 2009*). (*Biekre, 2013*).

4- Maladies virales

Plusieurs maladies virales s'observent sur la tomate. Les symptômes d'infection se manifestent généralement sur les feuilles. Ce sont des marbrures, des enroulements, des déformations, des taches ou des dessèchements de folioles dans certains cas. Les maladies qui sont dues à des virus ne sont pas tellement importantes dans la culture de tomate excepté celle du virus de la mosaïque du tabac (Tabacco Mosaïque Virus TMV) qui provoque l'apparition d'une mosaïque à zones claires et foncées sur les feuilles. Ces virus se transmettent par simple contact de même que par les semences et les débris végétaux laissés dans le sol. La TMV n'est pas transmise par les insectes. La lutte contre la maladie repose sur la mise en œuvre des mesures d'hygiène culturale (désinfection des semences, rotation des manipulations). (*Blancards, 2009*).

XI- Technologie de transformation de la tomate

La transformation de la tomate industrielle dans le monde a connu un développement considérable, ce développement consiste à une diversification parmi ces dérivés nous pouvons trouver sur le marché international et national tout une gamme de produits :

- **Pulpe de tomate** : c'est un produit obtenu après écrasement du fruit et élimination de la peau et les graines ;
- **Jus de tomates** : c'est une opération dont la pulpe a subi une fine désagrégation sans dilution ou concentration ;

Généralités sur la tomate

- **Sérum de tomate** : ce produit est obtenu par une filtration ou centrifugation de jus, cette opération consiste à éliminer complètement les particules solides en suspensions ;
- **Pâtes de tomates** : c'est le résultat d'une concentration de la pulpe avec un taux égal ou supérieur à 24 % de substances totales, ce produit considéré comme condiment ou purée de tomate sous forme de pâte est commercialisé dans de petits emballages ;
- **Purée de tomates** : c'est pâte de tomates de faible concentration dont le taux varie entre 8 et 24% de substances solides solubles, dans certains pays comme les Etats Unies d'Amérique cette purée est appelée aussi pulpe ou concentré de tomate ;
- **Sirop de tomate** : produit obtenu par une concentration du sérum de tomate ;
- **Sauces de tomates** : ces produits sont très réponsus et demandés ces dernières années notamment dans les restaurants et « fastfood ». Le marché dispose de deux produits :
- **Ketchup** : c'est un produit de fabrication de pays anglo-saxons les états Unis d'Amérique et la Grande Bretagne. Il s'agit d'une purée de tomate composée de vinaigre, de sel, d'oignon et d'ail ;
- **Sauce chili** : c'est un ketchup dont la tomate est entièrement utilisée et pelée.

Les produits à base de tomate sont définis comme étant des fruits de tomate écrasés avant ou après élimination des peaux et des graines (**Hayes et al, 1998**).

Le diagramme ci-dessous *figure 18* résume globalement les différentes voies qui permettent d'obtenir des produits dérivés de la tomate.

Chapitre I

Généralités sur la tomate

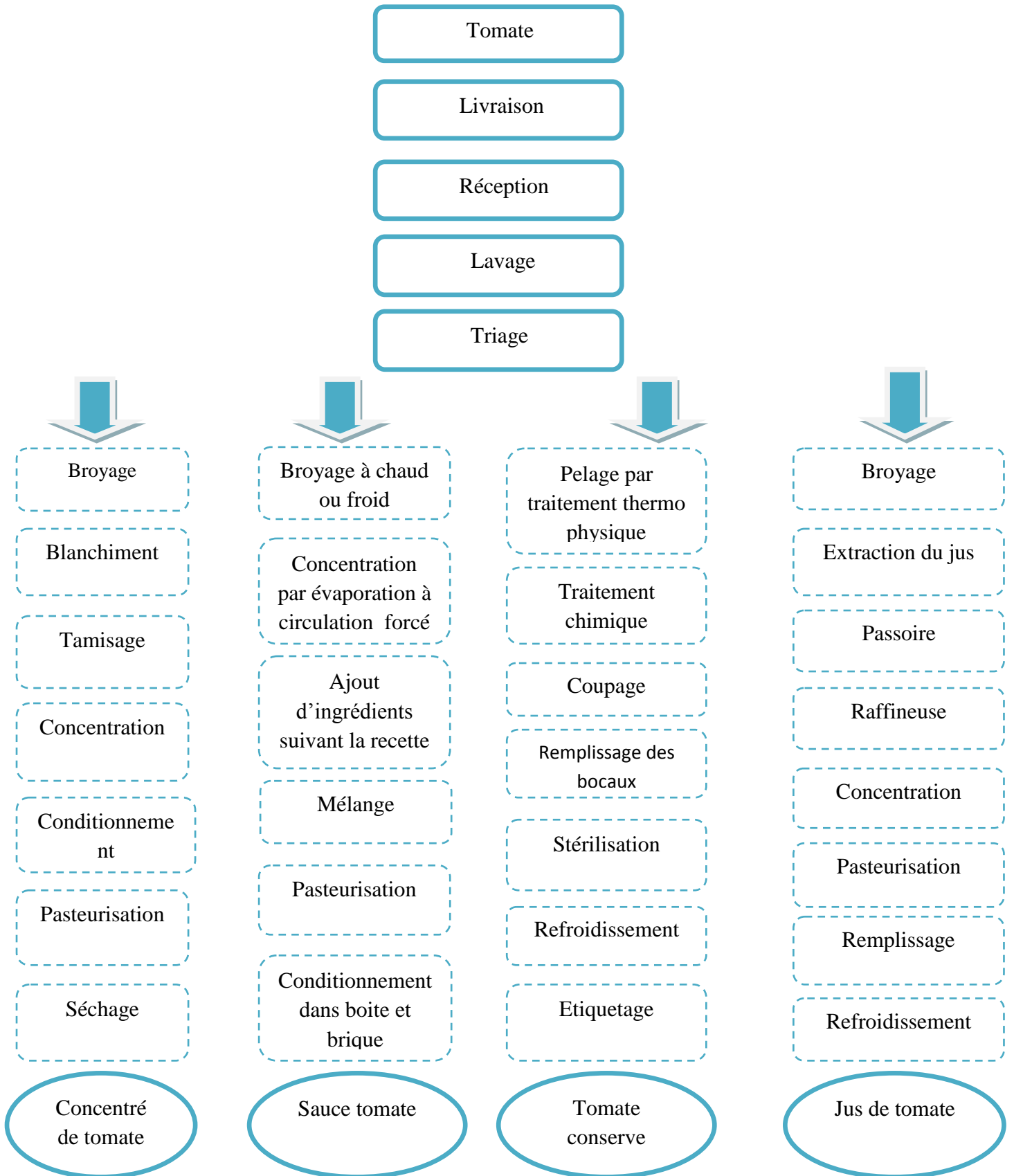


Figure 18 : Diagramme de transformation des tomates (Hayes et al, 1998).

Chapitre II



Généralités sur les agrumes ; le citron

Chapitre II

Généralités sur les agrumes ; le citron

I- Agrumes

1- Historique de la culture des agrumes

Dans l'esprit de tous, les agrumes sont les fruits des pays du soleil. Il serait plus juste de parler des pays du soleil...levant. En effet, ces végétaux proviennent historiquement d'Asie, et plus précisément de Chine, d'Inde, du Vietnam, des régions tropicales de Malaisie et d'Indonésie. Leur implantation en Europe a suivi le cours de l'histoire des hommes (**Carole, 2011**).

La plus grande partie de l'Antiquité grecque n'a pas connu les agrumes. Le cédratier, sorte de gros citron à la peau bosselée, a été le premier représentant de ces fruits. Il a été introduit en Grèce, à la suite des conquêtes d'Alexandre le Grand qui le menèrent jusqu'en Inde via la Perse, vers 330 avant notre ère. Il faudra attendre encore près de 1000 ans et le moyen âge avant que d'autres espèces d'agrumes n'arrivent jusqu'en Europe du Sud. La côte Nord, puis de l'Espagne, via le détroit de Gibraltar en 712, a fait connaître les citronniers et les bigaradiers (orange amère) et modifié pour toujours les paysages de ces régions (**Carole, 2011**).

Les croisades des Chrétiens vers la Terre sainte, à partir de 1095, ont également été l'occasion pour les croisés de découvrir ou de redécouvrir des arbres. A leur retour en Europe, ils ont tenté de les acclimater dans des régions situées plus au nord que le Bassin méditerranéen. La bergamote et l'orange douce sont arrivées quant à elles bien plus tardivement en Europe, à partir du XVI^e siècle. L'orange douce, dégustée en Inde par Vasco de Gama, a été diffusée par les Portugais et se serait alors implantée en sens inverse vers le monde arabe au cours des siècles suivants. Mais il est probable que les contacts commerciaux entre la Chine et le monde arabe l'aient fait connaître dès le X^e siècle au Moyen-Orient, du moins (**Carole, 2011**).

La mandarine, connue à la réunion au XVIII^e siècle, n'arriva en Europe qu'au début du XIX^e, tout comme les Kumquats. Ces derniers ont d'ailleurs été considérés comme des agrumes du genre Citrus jusqu'au début du XX^e siècle, mais en raison d'une composition nutritionnelle un peu différente, les scientifiques les ont finalement classés dans un genre à part, celui des Fortunella (du nom du botaniste britannique qui les fit connaître en Europe, Robert Fortune) (**Carole, 2011**).

Généralités sur les agrumes ; le citron

De nos jours, les agrumes sont cultivés dans toutes les régions du monde au climat suffisamment doux : sur les états, les pomélos de Floride et les oranges d'Afrique du Sud côtoient les gros pamplemousses de Chine et les mandarines corses (**Carole, 2011**).

Il faut pourtant s'attendre à voir apparaître des fruits en provenance d'autre pays encore, car en ce début de XXI^e siècle, de nouveaux agrumes sont encore découverts (**Carole, 2011**).

2- Définition

Le nom agrume est donné aux arbres appartenant au genre botanique *Citrus*, cette appellation d'origine italienne, désigne les fruits comestibles et par extension les arbres qui les portent. A cette catégorie d'arbre appartiennent les oranges, les mandariniers, les citronniers, les cédratiers, les pamplemoussiers (**Loussert, 1989**). Ils auraient été cultivés en Orient dès le IV^e millénaire avant J-C. de tous temps, ils ont été appréciés pour leur goût, leurs vertus médicinales, leurs parfums et leurs qualités décoratives (**Brébion et al., 1998**).

3- Espèces et variétés

D'après **Virbel-Alonso (2011)** les variétés d'agrumes sont très nombreuses. Elles sont même en augmentation car de nouveaux hybrides apparaissent régulièrement sur les marchés de l'agrumiculture des pays du bassin Méditerranéen est diversifiée, tant au niveau des variétés cultivées (oranges, mandarines, clémentines, pomelos, citrons, limes, pamplemousses pour ne citer que les plus courants) reflète d'une certaine manière la richesse et la variabilité de ces arbres, du fait de l'extension de cette culture. Il est évident que le nombre des variétés d'agrumes se révèle considérable, le choix variétal performant permet d'assurer une production importante du point de vue quantitatif comme qualitatif nous décrivons quelques variétés et quelques espèces d'agrumes (**Jacquemond et al, 2009**).

a- Oranges (*Citrus sinensis*)

Selon **Baha (2009)** l'oranger est une variété traditionnelle très appréciée par le consommateur pour ses qualités gustatives et produisant chaque année des rendements très élevés. Plusieurs variétés existent sur le marché *figure 19*.

Selon (**Jacquemond et al, 2009**). L'orange Navel précoce est sélectionnée aux Etats-Unis en 1910 à l'université de Riverside, et introduite à l'Espagne en 1933. C'est un arbre vigoureux à feuillage dense avec de grandes feuilles de couleur vert foncé. Les fruits, sans

Généralités sur les agrumes ; le citron

pépin, sont de couleur orange-rouge foncé et de calibre moyen (de 100 à 200 g.) par rapport à la Washington navel.

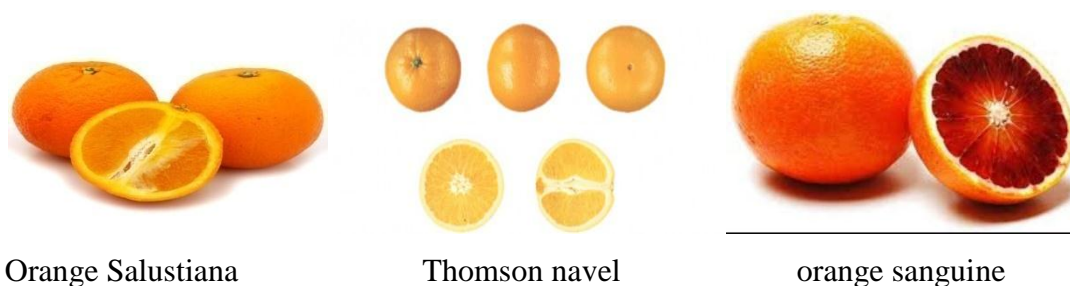
Selon **Baha (2009)** l'orange Salustiana est issue d'une mutation d'orange commune sélectionnée en Espagne dans les années 1950, variété très productive, très juteuse, aromatisée utilisée aussi bien pour le frais que pour le jus. Ils sont de couleur orange, sphériques, avec une peau plutôt fine mais difficile à éplucher et très juteux avec quelques pépins (de 0 à 5). Le calibre est plutôt moyen de 80 à 150 g.

Selon (**Jacquemond et al, 2009**). L'orange Thomson navel est issu d'une mutation précoce de Washington navel introduite en Californie en 1891. L'arbre est moins vigoureux que celui de la Washington navel, avec une frondaison dense et sphérique. Ils sont généralement de mauvaise qualité dès qu'ils ont atteint leur maturité dans les conditions de la Corse, à cause d'un taux de jus très faible. Les fruits sont plutôt gros (100 à plus de 200 g) et sans pépin. Ils sont de couleur orange, faciles à éplucher. Cette ancienne variété est aujourd'hui largement remplacée par des sélections de navels précoces de meilleure qualité.

Selon **Brebion et al, (1999)** les oranges Washington navels, elles se caractérisent par une excroissance plus ou moins prononcée, appelée ombilic (navel = ombilic en anglais) et par une quasi absence de pépins. Leur chair est peu croquante, juteuse et parfumée. On les pèle facilement et se sont d'excellentes oranges à déguster «en fruits». On trouve la Naveline (Naveline précoce), la Washington navel, la Thomson navel, grosse orange bien colorée et la Navel late, orange, ovale, à peau rugueuse et à chair bien sucrée. L'arbre de bonne vigueur a un port sphérique.

Les oranges sanguines **Selon Brebion et al, (1999)** ; leur pulpe est rouge ou rouge violacée, couleur due à l'abondance des pigments. Elle est très juteuse et acidulée, parfois de saveur légèrement Musquée.

Généralités sur les agrumes ; le citron



Orange Salustiana

Thomson navel

orange sanguine

Figure 19 : quelques variétés d'orange.

b- Mandarines

Selon **Brebion et al, (1999)** l'orange des Mandarins, a été cultivée en Chine pendant plusieurs centaines d'années avant d'être introduite en Occident, d'abord en Grande-Bretagne. Les premiers mandariniers arrivèrent en 1805 et s'implantèrent en Provence. La culture démarra en Algérie en 1850.

Jacquemond et al, (2009) montrent que les Satsuma sont des mandarines japonaises en générale précoces et sans pépin. Les Satsuma sont considérées comme très résistantes au froid. Les fruits varient de 80 à 120 g, de couleur vert-jaune et à pulpe orangée très colorée.

Selon **Brebion et al, (1999)** le clémentinier doit son nom au frère Clément qui hybrida un mandarinier et un bigaradier dans les jardins d'un orphelinat des Pères Blancs près d'Oran en Algérie vers 1902. Les frères cléments proposent de la nommer clémentine cette nouvelle mandarine sans pépins **figure 20**.



Satsuma wase (mandarine japonaise)

clémentine caffin

Figure 20 : quelques variétés de la mandarine.

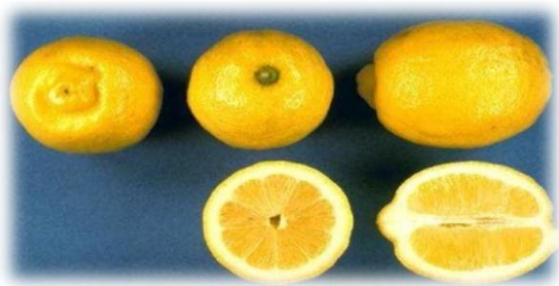
Généralités sur les agrumes ; le citron

c- Citrons

Selon **Virbel-Alonso (2011)** le Citrus limon à peau plus ou moins épaisse. La variété la plus cultivée en Europe est le Verna. On trouve aussi l'Eureka, en provenance des États-Unis mais cultivé également en France, et le Santa Teresa. Le citron vert (*Citrus aurantifolia*) n'est pas un citron jaune cueilli avant maturité, mais une espèce à part entière, que l'on appelle aussi la lime.

Le Citrus limon (Citron eureka frost) Selon **Jacquemond et al. (2009)** cette variété est sélection issue de semis de pépins (probablement de la variété Lunario) introduits en Californie depuis 1858. Cette variété vigoureuse, à floraison remontante, avec une très bonne production. Les feuilles sont plutôt fines. Les fruits, entre 80 et 150 g, sont assez réguliers et peu allongés, avec une peau lisse. Ils sont juteux avec quelques pépins. Il s'agit de la variété la plus cultivée dans le monde.

Le Citron Femminello selon **Jacquemond et al, (2009)** une variété très productive avec des fruits de 100 à 200 g contenant quelques pépins, les fruits sont juteux avec une très tenue sur l'arbre *figure 21*.



Citron limon, Eureka Frost



Femminello

citron Femminello

Figure 21 : quelques variétés de citron.

d- Limes acides

Selon **Brebion et al, (1999)** le citron vert fut diffusé autour de la Méditerranée par les Croisades puis les Portugais l'introduisirent en Amérique. C'est principalement cette lime qui était transportée sur les navires Anglais comme remède préventif contre le scorbut. C'est pourquoi les Anglais ont été désignés par les américains par le nom de Limeys.

La Lime Mexicaine (*Citrus aurantifolia*) (Synonymes Citron vert, Lime antillaise, Citron Gallet), Selon **Jacquemond et al. (2009)** Cette variété est cultivée un peu partout dans le monde dès lors que les conditions climatiques le permettent. L'arbre est très vigoureux, elle

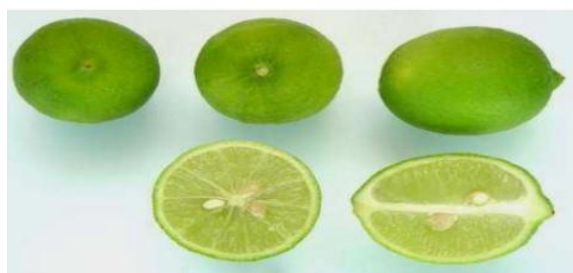
Chapitre II

Généralités sur les agrumes ; le citron

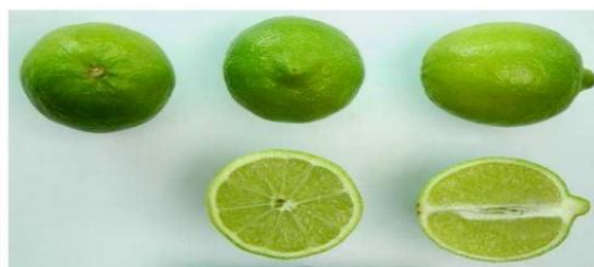
produit de petits Citrons ronds de 40 à 60 g à pulpe verte, avec 1 à 5 pépins, dont le parfum est très différent du parfum des citrons jaunes (*Citrus limon*). Les fruits ont une peau fine, jaune en zone froide, restant verte en région chaude.

La Lime Tahiti (*Citrus latifolia*) (Synonymes Citron vert et lime de Perse) Selon **Jacquemond et al. (2009)** elle aurait été introduite à San Francisco, aux Etats-Unis, entre 1850 et 1880. Produit des fruits plutôt allongés de 70 à 80 g à pulpe verte très juteuse, sans pépin, dont le parfum est très différent du parfum des Citrons jaunes (*Citrus limon*). La peau de ces fruit est fine, jaune en zone froide, restant verte en région chaude.

Les limes doux Selon **Jacquemond et al. (2009)** une variété dont les fruits sont généralement dépourvus d'acidité. Les fruits sont généralement jaunes à maturité, de forme plus ou moins allongée avec un mamelon. La lime de Palestine ou lime douce du Brésil (*Citrus limetioïdes*) est un fruit à peau lisse, de forme plutôt arrondie, et présentant quelques pépins *figure 22*.



Lime Mexicaine



lime Tahiti



Limes doux

Figure 22 : exemples de limes acides.

Généralités sur les agrumes ; le citron

e- Pamplemousses

Selon **Virbel-Alonso (2011)** le pamplemousse (*Citrus grandis*) est un fruit qui peut mesurer jusqu'à 30 cm de circonférence et sert surtout à réaliser des marmelades ou parfois des jus. Il est également utilisé dans la fabrication de médicaments. Le pomélo (*Citrus xparadisi*), que l'on appelle à tort « pamplemousse », est beaucoup plus petit et possède une chair blanche ou rosée. Le Ruby Red et le Star Ruby sont des variétés bien connues **figure 23**.

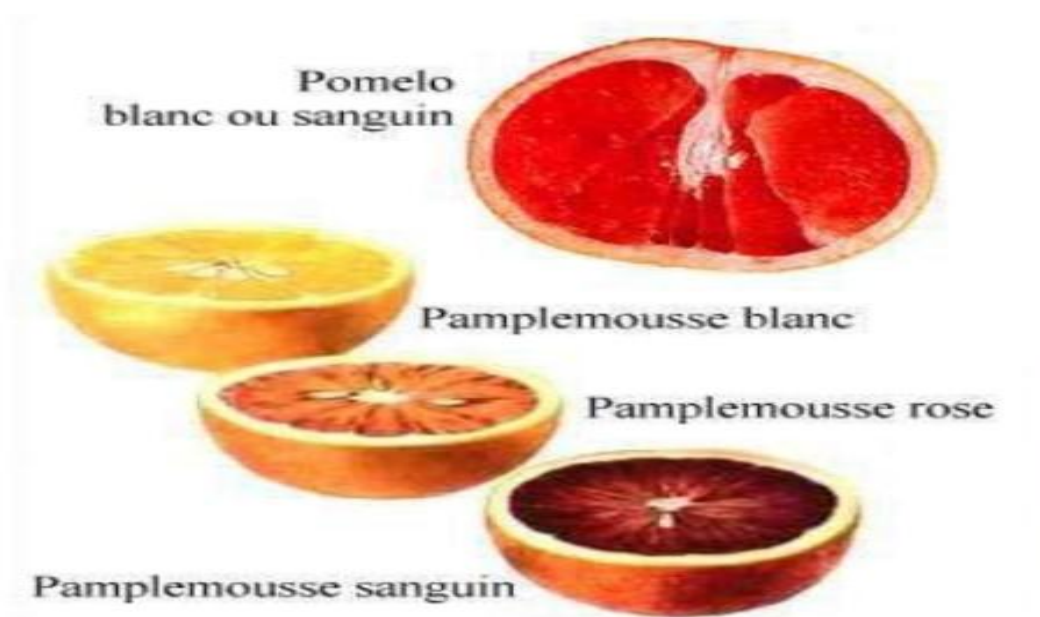


Figure 23 : différents types de pamplemousse.

f- Pomelos (Hybride supposé entre pamplemousse et orange)

Selon **Brebion et al, (1999)** le pomelo est une hybridation ou une mutation de pamplemoussier, apparue aux Antilles au début du XIX^{ème} siècle. Il est surtout cultivé dans les pays tropicaux (Antilles, Floride et Amérique du sud), mais il fructifie bien aussi sur la Côte d'Azur. La variété à chair acide "Duncan" sert surtout à la fabrication de jus; elle est peu à peu remplacée sur les tables par les variétés "Ruby" ou "Star Ruby", à chair rosée et douce.

Pomelo March (*Citrus paradisi*) Selon **Jacquemond et al, (2009)** ce Pomelo à chair blanche, très amère, a été l'une des premières variétés de pomelos commercialisées qui soient presque sans pépin. Ils sont jaunes, sphériques, aplatis aux deux pôles et avec une peau lisse. On trouve parfois quelques pépins. Cette variété de moins en moins consommée est toujours très utilisée pour la transformation en jus **figure 24**.

Généralités sur les agrumes ; le citron

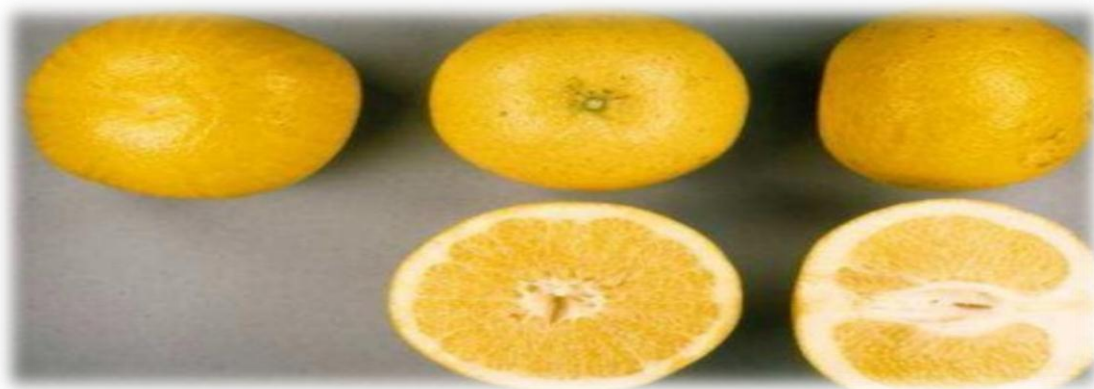


Figure 24 : pomelo March.

g- Kumquats (*Fortunella* sp)

Selon **Virbel-Alonso (2011)** le kumquat (*Fortunella* sp.) produit des petits fruits que l'on mange tout entiers, avec l'écorce qui ne contient pas d'huiles essentielles brûlantes. Ils peuvent également être utilisés en confiserie ou en sirop. Une autre caractéristique de cet arbre est de bien résister au froid: certains auteurs parlent de $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les principales variétés sont les principales variétés sont Kumquat marumi (*Fortunella japonica*), aux fruits ronds, orange et à chair douce, et Kumquat nagami (*Fortunella margarita*) aux fruits ovales, jaune orangé et à chair acide **figure 25**.

Kumquat marumi Selon **Jacquemond et al, (2009)** ce sont les seuls agrumes qui se consomment avec la peau. On trouve sur le marché deux principales variétés. Le Nagami (*Fortunella margarita*) à fruits longs et acidulés. Et le Marumi (*Fortunella japonica*) à fruits ronds, plus doux mais beaucoup plus fragiles. Il s'agit toujours de petits fruits de couleur orange, à peau lisse, variant de 25 à 40 g et avec 2 à 5 pépins.



Figure 25 : kumquat marumi.

Généralités sur les agrumes ; le citron

4- Production des agrumes

a- Production mondiale

Les agrumes (orange, mandarine, citron) sont parmi les fruits les plus abondants dans le monde, la production mondiale en agrume est considérée comme l'une des plus importantes dans le domaine agricole (**Traquato et al, 2017**). La production mondiale d'agrumes se situe autour de 89 millions de tonnes (MT), dont 73% de la production sont consommés en frais, 26% sont destinés à la transformation et 9% à l'exportation. Cette production est répartie en plusieurs variétés d'agrumes dont laquelle l'orange représente 57%, la mandarine 30%, le pamplemousse 7% et le citron et la lime 6% (**USDA, 2014**). Avec une production de 17.34 MT, le Brésil est le premier producteur d'oranges dans le monde. Il assure 34% de la production mondiale, suivi par la Chine (7.6 MT), les Etats-Unis (6.26 MT) et l'union Européennes (6.07 MT).

Dans la région Méditerranéenne, 22.5 MT d'agrumes sont produites par les 12 pays membres du Comité de Liaison des Agrumes Méditerranéens (CLAM) dont l'Espagne, le Maroc, la Turquie, l'Italie, l'Egypte, la Grèce, la Tunisie (**USDA, 2014**).

b- Production nationale

La production d'agrumes en Algérie a connu une importante croissance elle est passée de 10 878 320 quintaux en 2012 à 13 419 940 quintaux en 2015, avec une production d'orange qui est estimée aux environs de 10 050 791 quintaux, et les meilleures productions en oranges sont enregistrées dans les wilayas de Chlef et Blida, avec des productions qui sont respectivement de 1 155 520 et 3 079 216 quintaux (**MADRAP Alger, 2017**).

La wilaya de Bejaia est une région qui a une activité agricole très importante, telle que les céréales, le fourrage, les oliviers ainsi qu'une grande superficie de 2006.98 Ha qui est occupée par le secteur agrumicole dont les productions sont estimées à plus de 206798 quintaux rien qu'entre l'année 2014 et 2015 (**DADRP Bejaia, 2017**).

Les premiers exemples de programmes d'amélioration variétale d'agrumes apparaissent en Italie à la fin du XIX^{ème} siècle, lorsque de très graves infections de *Phytophthora spp* ont détruit tous les oranges (*Citrus sinensis L. Osbeck*), les citronniers (*C. limon L. Burun. f.*) et les mandariniers (*Citrus deliciosa Ten.*), qui à cette époque étaient réponsés par semis et en Floride lorsqu'un gel causa d'immenses dégâts au secteur des agrumes (**FAO, 2001**).

Chapitre II

Généralités sur les agrumes ; le citron

II- Citron

1- Historique et origine

les agrumes sont d'origine sud asiatique, selon (**Tanaka, 1977**), la diffusion à travers le monde s'est effectuée lors des échanges commerciaux. Certains prétendent que ce fruit serait né d'un croisement entre le pamplemousse, le cédrat et la lime. Ses premiers traces remontent il y a près de 3000 ans lors de sa découverte dans les forêts de Himalaya. Par la suite, il a été cultivé abondamment en chine (**Tanaka, 1977**).

C'est à partir du bassin méditerranéen et grâce aux grandes découvertes (Christoph Colomb ;1493 et les navigateurs ANGLO-HOLLANDIS 1654) que les agrumes furent diffuser dans le monde (**Praloran, 1971 ; Lousser, 1989**). Au fil des invasions et des fluctuations climatiques, il se peut que le citron ait disparu du sud de l'Europe à quelques reprises pour y être réintroduit plus tard. Après les invasions barbares (350 à 400 de notre ère), ce sont les Arabes du Nord, et en Espagne, de même que tout le bassin méditerranéen. Les Européens de l'ouest de l'est et du nord découvriront les agrumes et développeront un goût pour ces fruits acides et juteux qu'ils rapporteront dans leur pays respectif (**Jacquemend et al., 1986**).

2- Définition

Les citrons (*Citrus limonia*) font partie de la vaste famille des *Rutaceae* originaire du bassin méditerranée, (**Gollouin et Tonelli, 2013**). Le fruit de citronner est une baie cortiquée. Selon les espèces, la fleur se transforme en fruit mur, de forme ronde, allongée ou ovale (8 à 12 cm de long sur 5 à 6 cm de diamètre), présentant un téton à une extrémité et quelquefois à chaque extrémité (**Espirad, 2002**). Il reste longtemps sur l'arbre sans que le goût s'altère (**Bachés, 2011**).

Le citron ou limon serait originaire de l'Inde. Le citronnier est un arbuste vigoureux aux branches robustes et épineuses. Les feuilles alternes et coriaces sont grandes et très parfumées. Les fleurs sont blanches et peu odorantes, regroupées à l'aisselle des feuilles. Le fruit est lourd, charnu, ovoïde dont la texture, la forme et la couleur varient selon les espèces. Sa chair se divise en 6 ou 12 quartiers et contient peu de pépins. Le citron est cueilli avant maturité pour lui conserver son acidité. (**Rymond D, 1998, Nathalie R, 2007-2008, Isabelle E, 2011**).

Généralités sur les agrumes ; le citron

Le goût acide de citron provient d'acide organique (citrique et malique) ne reste pas à l'état d'acides dans les cellules. Des expériences ont largement prouvés que l'usage prolongé du citron apporte à l'organisme du carbonate de potasse lui permettant de neutraliser l'excès d'acidité du sang et du milieu hormonal. (Rymond D, 1998).

3- Types et variétés

Ces variétés sont sélectionnées pour leur valeur commerciale : productivité, richesse en jus, capacité d'être récolté toute l'année.

a- Citronnier 4 saisons

➤ Citronnier Eureka

Le plus connue des citronniers 4 saisons, une variété californienne (XIXe siècle) qui pousse toute l'année et en abondance. Il produit des citrons jaunes, juteux, et très parfumés, et excellent au niveaux du rendement (www.aujardin.info).

➤ Citronnier villa franca

Originaire de Sicile, ce citronnier des 4 saisons à port compact présente de larges feuilles vert brillant et peu d'épines. Productifs, il assure une récolte abondante presque toute l'année. Les fruits à peau fine, jaunes, sont très juteux et n'ont pas beaucoup de pépins, ils sont très appréciés pour leur jus (www.aujardin.info).

➤ Citronnier poire

Citrus limon poire est une variété 4 saisons encore peu connue. Ses fleurs blanches parfumées, très dense embaument le jardin une première fois en mars/avril puis en fin d'été *figure 26* (www.aujardin.info).



Figure 26 : citronnier 4 saisons.

Généralités sur les agrumes ; le citron

b- Citronnier Meyer

Cet hybride entre une mandarine et une citron, originaire de chine arrive aux Etats unis au début de XXe siècle. Depuis le succès de citrus limon ‘Meyer’ ne cesse de croître grâce à son rendement excellent et à sa vigueur. Ce fabuleux citronnier produit des fruits au peu très lisse très fine, jaune orangé à la maturité pratiquement 8 mois sur 12. La pulpe très juteuse et orangée *figure 27*. Elle développe en bouche un goût moins acide que les autres citrons (www.aujardin.info).



Figure 27 : limon Meyer.

c- Citron caviar

Citrus australasica est originaire d’Australie. Ce grand arbuste buissonnant et très épineux fleurit de l’hiver à l’été. Les fruits étonnants sont allongés rugueux, de couleur verte puis jaune, voire brune. Mais le plus stupéfiant reste sa pulpe constituée de petites perles tantôt jaunes, vertes, roses et orangées *figure 28* au vif parfume citronnée. Les fruits sont récoltés entre octobre et décembre (www.aujardin.info).



Figure 28 : citron caviar, citrus australasica (arbre et fruit).

Généralités sur les agrumes ; le citron

d- Citronnier Gallet

Arbre épineux au port buissonnant *citrus aurantifolia*, produit les fameux citrons verts très appréciée pour leur arôme incomparable, ces petits fruits sont sphériques de 5 centimètres de diamètre au maximum à la peau lisse et brillante *figure 29*. Dans les pays tropicaux où est cultivées, cet arbre est continuellement e couvre de fleurs blanches très odorante, il fleurit deux fois ; au printemps puis en automne. La récolte intervient 5 à 6 mois après cette dernière (www.aujardin.info).



Figure 29 : *citrus aurantifolia* ; citron Gallet.

e- Citronnier YUZU

Citrus junos YUZU, plus résistant que les autres citronniers (-10C° en sole très drains et protégés des vents dominants). L'arbuste au port buissonnant est très épineux. Il produit de gros fruits bosselés à peau épaisse et jaune, peu juteux et remplis de pépins *figure 30*. Ce citron est cultivé pour son zeste aux notes à la fois acidulées et épicées (www.aujardin.info).



Figure 30 : citronnier YUZU, bio agrume rare.

f- Citronnier doux

Citrus limette est un bel arbuste au feuillage vert brillant dentelé et peu épineux, il est l'un des premières variétés à avoir été acclimatée sur des pourtours méditerranéens. Ses fleurs en étoiles effilées parfumées sont présentes durant longs mois succédant pour donner naissance de gros fruits de novembre à avril. Ses citrons jaunes de forme arrondie à la peau grumeleuse mais fine *figure 31*, et odorante, sont d'une douceur étonnante (www.aujardin.info).

Généralités sur les agrumes ; le citron



Figure 31 : quelques citrons doux ; de Rome et d'Iran.

4- Anatomie et morphologie

Les citrons (*Citrus limonia*) font partie de la vaste famille des « *Rutaceae* », le nom anglais est *lime*. D'un point de vue botanique, ce sont des fruits charnus de type bai avec un péricarpe structuré en trois parties bien différenciées : l'épicarpe (Flavédo), mésocarpe (Albédo) et l'endocarpe (pulpe) (**Espirad, 2002**). La **figure 32** représente les caractéristiques morphologiques d'un citron.

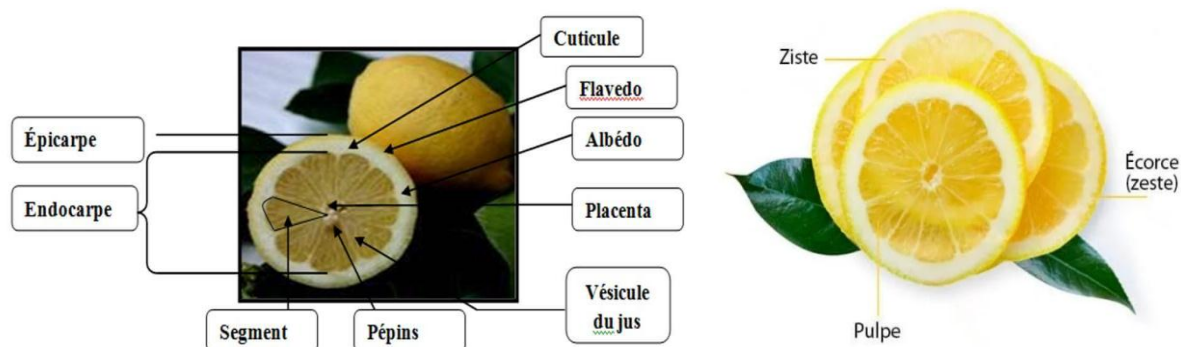


Figure 32 : Caractéristiques morphologiques d'un citron.

5- Composition biochimique

Comme les autres agrumes, les feuilles et les fruits très juteux de citron sont des sources de composés naturels, tels que 90% d'eau, fortement acide (pH inférieur à 3), dont l'acidité est due essentiellement à l'acide citrique accompagné de faibles quantités d'acides malique, caféique et férulique. Le citron est un fruit remarquable par sa haute teneur en vitamine C et d'un large éventail de vitamines du groupe B avec des quantités considérables de flavonoïdes (naringosides, hesperidosides) et des poly phénols. Les citrons frais sont faibles en calories et en sucre, mais les fibres (cellulose, hémicelluloses et pectines) représentent 2,1% du poids total. La teneur en protéines ne dépasse pas 1g/100g. Diverses substances minérales ont été

Chapitre II

Généralités sur les agrumes ; le citron

identifiées dans le citron, il est riche en calcium, magnésium et potassium qui est le minéral le plus abondant. Les teneurs en différents constituants sont représentées dans le **tableau 04**.

Tableau 04 : Composition biochimique moyenne dans 100 g de citron (Ciquial, 2013).

Constituant	Teneur moyenne	Constituant	Teneur moyenne
Eau (g)	89.2	Béta carotène (µg)	3
Protéines (g)	0.8	Vitamine E (mg)	0.8
Glucides (g)	2.45	Vitamine C (mg)	53
Lipides (g)	0.3	Vitamine B1 (mg)	0.05
Sucres (g)	2.2	Vitamine B2 (mg)	0.02
Fibres (g)	2	Vitamine B3 (mg)	0.2
Sodium (mg)	<3	Vitamine B5 (mg)	0.19
Magnésium (mg)	8.93	Vitamine B6 (mg)	0.08
Potassium (mg)	149	Vitamine B9 (mg)	11
Calcium (mg)	18	Phosphore (mg)	15.5

6- Valeur nutritive et effet thérapeutique

Diverses études expérimentales ont montré l'existence d'une relation importante entre les flavonoïdes de citron et la diminution de l'oxydation (Gonzalez-Molina *et al.* 2010). Les feuilles de citron sont utilisées conjointement avec d'autres plantes comme le thé et la menthe afin de stimuler la circulation, apporter tonus et vitalité, lutter contre l'anémie et traiter les troubles d'estomac (Whistler, 1997). Les écorces et les graines sont employées pour renforcer les défenses immunitaires indispensables, et traiter les maladies dégénératives telles que l'hypertension (Oboh, 2012), le cholestérol, le diabète, l'obésité et quelques cancers. Aussi, il prévient contre le rhumatisme et la thrombose (Manish *et al.*, 2013; Ercan *et al.*, 2011; Tripoli *et al.* 2007; Ramful *et al.*, 2011; Del-Rio *et al.*, 2004; Manthey *et al.*, 2001). Les huiles essentielles de citron est employée depuis l'antiquité par les industries de la parfumerie (Janati *et al.*, 2012).

7- production de citron

Selon FAO (l'organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture des Nations Unies), en 2017, l'Inde, la Chine, le Mexique, le bassin Méditerranéen étaient les plus grands producteurs au monde des citrons et des limes. L'Algérie disposait d'une superficie plus de 4

Chapitre II

Généralités sur les agrumes ; le citron

365 Ha pour la culture de citron, (**Ministre de l'agriculture et de développement rural, 2012**), Le tableau ci-dessous montre les statistiques (en tonne) des sept premiers pays producteurs de citron et lime au monde.

Tableau 05: grands producteurs de citron et lime da monde.

Pays	Production de citron 2016 (tonnes)
Mondiale	15981.8
Régions méditerranéenne	3034.1
Inde	2613.8
Chine	2405.9
Mexique	2270.0.
Brésil	1214.5
Espagne	950.0
USA	847.0
Algérie	93.2

8- Jus de citron

La qualité d'un citron n'est que partiellement liée à celle de son jus car la peau représente une part importante de la valorisation du citron. Le rendement théorique en jus pulpeux est en moyenne de 45 %, comme jus de citron, il est surtout utilisé comme base de boissons et de sirop. La demande concerne surtout des jus très pulpeux. Le rendement usuel est voisin de 40 %, soit un rendement d'extraction de 90 % [**Espirad 2002**]. Les caractéristiques physicochimiques de jus de citron sont représentées dans le **tableau 06**.

Tableau 06 : caractéristiques physicochimiques de jus de citron [**Espirad 2002**].

Caractéristique	Valeur	Caractéristique	Valeur	Caractéristique	Valeur
Brix °	7 à 12	Vitamine C	300 mg/l à 500 mg/l	Pulpe	10 à 15 %
Densité	1.03 à 1.04	Huile	0.2ml/l	Décantable	/
Sucre	17 à 27 g/l	pH	2 à 3.2	Coloration	Jaune

Chapitre III



Jus de fruits

Chapitre III

Jus de fruits

I- Définition

Produit fermentescible mais non fermenté, obtenu à partir de fruits sains et mûrs, frais ou conservés par le froid, d'une espèce ou de plusieurs espèces en mélange, possédant la couleur, l'arôme et le goût caractéristique du jus des fruits dont il provient, [décret français n° 2003-838 du 1er septembre 2003].

Le jus de fruit est un liquide non fermenté, mais fermentescible, tiré de la partie comestible de fruits sains, parvenus aux degrés de maturation approprié et frais ou de fruits conservés dans de saines conditions par des moyens adaptés et/ou par des traitements de surface post-récolte (Anonyme, 2005).

Le jus est obtenu par des procédés mécaniques et doit posséder la couleur, l'arôme et le goût caractéristique du fruit dont il provient (Espirad, 2002).

II- Différents types de jus de fruits

✚ Purs jus de fruits

Ce sont des jus obtenus à partir de fruits par des procédés mécaniques (Boidin et al, 2005).

✚ Jus à base de jus concentrés

C'est le produit obtenu à partir de jus de fruits concentré, après restitution de la proportion d'eau extraite du jus lors de la concentration, l'eau ajoutée présentant des caractéristiques appropriées, notamment de point de vue chimique, microbiologique et organoleptique de façon à garantir les qualités essentielles du jus. La restitution de son arôme se fait au moyen des substances aromatisants, récupérées lors de la concentration de jus de fruits dont il s'agit ou de jus de fruits de la même espèce et qui présente des caractéristiques organoleptiques et analytiques équivalentes (Leyrel, 2008).

✚ Jus de fruits obtenus par extraction hydrique

Le produit obtenu à partir de jus de fruits d'une ou plusieurs espèces par l'élimination physique de la quasi-totalité de l'eau de constitution. La restitution des composants aromatiques est obligatoire (Boidin et al, 2005).

Pour les jus de fruits déshydratés, le qualificatif "déshydraté" peut être accompagné ou remplacé par le qualificatif "lyophilisé" ou toute autre mention analogue selon le procédé de déshydratation utilisé (Vierling, 2008).

Chapitre III

Jus de fruits

✚ Purée de fruits

Produit obtenu par des procédés appropriés, par exemple en passant au tamis ou en broyant la partie comestible du fruit entier ou pelé sans en prélever le jus. Le fruit doit être sain, parvenu à un degré de maturation approprié et frais ou bien conservé par des moyens physiques ou par un ou plusieurs des traitements appliqués conformément aux dispositions pertinentes de la commission du (**Codex Alimentarius, 2005**).

✚ Boissons aux fruits

Sont composées de jus de fruits concentrés ou non, d'eau et de sucre et contiennent au moins 25% de jus de fruits, dans le cas des boissons plates. Dans les boissons aux fruits gazeuses cette teneur est d'au moins 10% (**Boiron, 2008**).

✚ Concentré de purée de fruits

Produit obtenu par élimination physique de l'eau de la purée de fruits en quantité suffisante pour accroître la valeur Brix d'au moins 50% par rapport à la valeur Brix établie pour le jus reconstitué du même fruit (**Codex Alimentarius, 2005**).

✚ Nectar de fruits

Le nectar de fruits est le produit non fermenté, mais fermentescible, obtenu en ajoutant de l'eau, avec ou sans adjonction de sucres, de miel et/ou de sirops, et/ou d'édulcorant, ou à un mélange de ces produits. Des substances aromatiques, des composés aromatisants volatils, de la pulpe et des cellules, qui doivent tous avoir été obtenus à partir du même type de fruit et par des moyens physiques adaptés, peuvent être ajoutés. Le mélange de nectars de fruits est le même produit, obtenu à partir de plusieurs types de fruits différents (**Codex Alimentarius, 2005**).

✚ Jus gazéifiés

Ils sont saturés en gaz carbonique, ce qui augmente la propriété rafraîchissante de la boisson (**Fredot, 2007**).

D'après la définition encyclopédique, le jus de fruits correspond au " Suc naturel des fruits obtenu par pression ou centrifugation".

Suite à cette définition, la réglementation européenne (décret français n° 2003-238 du 1^{er} septembre 2003) a défini 5 types de jus :

- " **jus de fruits**" obtenu par simple pression des fruits.
- "**jus de fruits obtenu à partir d'un concentré**" produit obtenu en remettant dans le jus de fruits concentré l'eau extraite lors de la concentration.

Chapitre III

Jus de fruits

- "**jus de fruits concentré**" jus obtenu par élimination d'environ 50 % de l'eau de constitution.
- "**jus de fruits déshydraté/en poudre**" produit obtenu par élimination de la quasi-totalité de l'eau de constitution.
- "**nectar de fruits**" produit obtenu en ajoutant de l'eau et des sucres à une purée de fruit.

III- Composition biochimique et importance nutritionnelle

La composition des jus de fruits et du jus d'orange en particulier est identique à celle des fruits dont ils sont issus, une partie des fibres et la cellulose en moins. Les jus sont composés des mêmes glucides, des mêmes minéraux et des mêmes vitamines que les fruits. La référence aux tables de composition existantes (**tableau 07**) permet de constater que les jus renferment de 87 à 89 % d'eau, ce qui confère à l'aliment son rôle hydratant avant tout. Leur faible apport énergétique et leur richesse en minéraux, et particulièrement en potassium, contribuent à leur intérêt nutritionnel. Les jus d'agrumes se distinguent des autres jus par leur faible taux de glucides, leurs teneurs en minéraux et en vitamines supérieures aux autres jus, en particulier la vitamine C et la vitamine B9 (acide folique).

Les glucides contenus dans les jus de fruits sont principalement le fructose (prédominant), le glucose et le saccharose. Pour les agrumes, environ 80 % de la matière sèche hydrosoluble sont représentés par les glucides et 10 % sont constitués par les acides organiques (acide citrique principalement) (**Ting, 1980**).

Tableau 07 : table de composition de quelques jus de fruits. (**Favier, 1995**).

Composition	Jus de Jus	de Jus	de Jus	Jus	Jus	Jus	de Jus
Pour 100g de jus	100g	pomme	raisin	d'ananas	d'abricot	pomelos	d'orange
Energie (Kcal)	45	61	51	59	37	39	
Protéine (g)	0.1	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	
Lipides (g)	Traces	Traces	0.1	0.1	0.1	0.2	
Glucides (g)	11	15	12	14	8	<8	
Eau (g)	87	83	86	84	90	89	

Chapitre III

Jus de fruits

Vitamine C (mg)	Traces	Traces	9	3	38	50
Vitamine B9 (µg)	1	3	10	-	7-10	20-30
Minéraux (mg) P+ Na+ Ca+ Mg + Fe	20.3	43.3	35.3	20.4	34.2	39.4
Potassium (mg)	120	140	127	120	144	182
Flavonoïdes (mg)	11.3	2.1	-	-	18	14.7
B- carotène (µg) (provitamine A)	Traces	15	10-20	600	4-6	42-70

Par ailleurs, les jus de fruits sont une source intéressante qualitativement et quantitativement de vitamines que l'on peut mettre en évidence sur la base des Apports Journaliers Recommandés (AJR) pour un adulte (**tableau 08**). Les principales vitamines intéressantes sont la vitamine C, le β -carotène, la vitamine B9 et éventuellement la vitamine E pour quelques jus à base de mangue par exemple.

Tableau 08 : apports journaliers recommandés en vitamines pour 100g de jus (Gissinger, 2003).

/	Provitamine A (B- carotène)	Vitamine E	Vitamine B9 (acide folique)	Vitamine C (acide ascorbique)
AJR	3mg/jour	12mg/jour	200 µg /jour	60mg/ jour
Pomme	-	4%	3%	20%
Raisin	-	-	3%	7%
Ananas	-	-	1%	32%

Chapitre III

Jus de fruits

Abricot	60%	4%	2%	16%
Tomate	18%	-	7%	25%
Mangue	93%	8%	18%	65%
Mandarine	8%	-	-	53%
Pomelos	-	2%	6%	73%
Orange	2%	2%	12%	83%

Au vu de ce tableau, les jus d'agrumes parmi les autres jus seraient les meilleures sources de vitamine C et B9. Pour la vitamine A, mis à part les jus de mandarines qui peuvent entrer dans la composition des jus multi fruits, le jus d'orange par sa faible teneur en β -carotène n'apparaît pas être le jus idéal pour l'apport pro-vitaminique A. Cependant, il convient de rappeler que ce genre de données n'inclut pas les autres caroténoïdes pro vitaminiques tels que la β -crypto xanthine. Néanmoins, les jus à base de mangue ou d'abricot généralement consommés sous forme de nectars représentent des sources non négligeables de provitamine A.

IV- Technologie de fabrication des jus de fruits

1- Préparation des fruits pour la transformation

Au niveau industriel, pour rendre les fruits apte à la transformation, un certain nombre d'opération de prés-traitement sont nécessaires. L'ordre des opérations de prés-traitement varie suivant l'espèce et le mode de transformation choisi. On cite (**Nout et al, 2003**)

Triage

Se fait selon le degré de maturité des fruits, leurs teintures, qui déterminent dans une large mesure la qualité du jus. Le triage est indispensable pour éliminer les fruits de mauvaise qualité, ainsi que les corps étrangers (feuilles, branchettes...etc.) (**Benamara et Agougou, 2003**).

Lavage-Nettoyage

Cette opération permet d'éliminer les pierres, les déchets terreux, les feuilles, une partie des microorganismes de surface et les résidus de produits de traitement phytosanitaire. Il peut se faire par plusieurs méthodes, par exemple, par aspersion d'eau, par aspersion suivie d'un trempage, etc. l'eau utilisée doit être dans la mesure du possible, propre, potable et être renouvelée (**Nout, 2003**).

Chapitre III

Jus de fruits

2- Traitements préalables de la matière première avant l'extraction

✚ Broyage

Le processus mécanique d'action sur les tissus végétaux est le concassage. Les fruits sont coupés en petits morceaux, en conséquence de quoi le jus s'écoule du tissu végétal. Il est important de prendre en considération le type de la matière première à concasser. Les fruits à pépins et les tomates par exemple, sont broyés ensemble avec les graines (**Benamara et Agougou, 2003**).

✚ Traitement thermique

Dans le processus du chauffage, les pectines se coagulent et se déshydrates. Les cellules perdent leurs élasticités et la libération du jus devient facile. Les paramètres des processus thermiques (temps-température), dépendent de l'espèce, de la matière première, et du degré de maturité des fruits (**Benamara et Agougou, 2003**).

3- Extraction du jus

Cette opération a pour but d'extraire le jus des fruits tout en effectuant un tamisage de la pulpe (**Nout, 2003**). Le jus à partir de la masse broyée peut être extrait par pressurage, centrifugation, diffusion...etc (**Benamara et Agougou, 2003**).

✚ Pressurage

Le pressurage est la méthode fondamentale la plus répandue dans l'industrie des jus. Après le traitement préalable, les fruits sont pressés en vue d'une extraction complète du jus et de la préservation de sa qualité, il est recommandé, durant le pressurage, d'observer les conditions suivantes (**Benamara et Agougou, 2003**).

- ✓ Adopter pour les paquets, des tissus perméables au jus et retenant les particules solides.
- ✓ Appliquer des surfaces dures pour créer une pression sur la masse fruitière.
- ✓ Séparer le jus sorti naturellement avant le pressurage.
- ✓ Ameublir la masse fruitière pendant le pressurage.
- ✓ Mener le pressurage en continu.

✚ Raffinage

Il a pour but de séparer les pépins de la pulpe. Il est fait sur passoire centrifuge après chauffage de la pulpe comme pour la tomate. Une action enzymatique d'hydrolyse des polysaccharides faciliterait cette opération, mais enlèverait toute viscosité au jus. Ceci est surtout préjudiciable pour la fabrication de confiture ou de marmelade (**Espirad, 2002**).

4- Traitements des jus

✚ Clarification

La clarification est pratiquée pour donner à certains jus la transparence que désire le consommateur. Cette clarification est obtenue soit par l'action des enzymes pectinolytiques, amylolytiques et protéolytiques, suivies de débouillage centrifuge, de collage, ou par filtration (**Espirad, 2002**).

✚ Désaération

La désaération va permettre de recalculer l'oxygène introduit dans les jus de fruits au cours de différentes opérations parce que l'oxygène est nocif et entraîne des pertes de vitamine C (**Claudian, 1986**).

✚ Pasteurisation

La pasteurisation consiste à porter très rapidement le jus à 95°C- 97°C, à le maintenir une douzaine de secondes à cette température, puis à le refroidir tout aussi rapidement. Le but de la pasteurisation est d'éliminer la majorité des microorganismes viables dans le jus de fruits et d'inhiber l'action des enzymes susceptibles de provoquer des réactions chimiques indésirables (**Cheftel, 1986**).

✚ Concentration

L'opération de concentration vise à éliminer environ 80% de l'eau contenue dans le jus de fruits, elle est le plus souvent réalisée par évaporation sous vide d'une grande partie d'eau, à une température qui n'atteint pas 30°C pendant 5 à 7 minutes (**Vasseneix, 2003**).

✚ Refroidissement et conditionnement

Le refroidissement du produit est lié au type de conditionnement et au mode de conservation souhaité. On distingue en effet trois procédés différents:

- ✓ Le conditionnement dit stérile; le jus est mis dans l'emballage primaire à chaud et le plus près possible de la température de pasteurisation, en préchauffant l'emballage. Celui-ci est alors serti, et l'ensemble subit une pasteurisation de sécurité (**Espirad, 2002**).
- ✓ Dans le conditionnement dit aseptique ou dans celui destiné à la congélation; le jus est refroidi aussitôt après pasteurisation et avant d'être conditionné dans l'emballage aseptique choisi (**Espirad, 2002**).

Chapitre III

Jus de fruits

- ✓ Il est possible de stocker les produits pasteurisés et refroidis dans des tanks aseptiques sous atmosphère de gaz neutre, gaz carbonique (CO₂) ou azote; mais les produits doivent être à nouveau pasteurisés avant commercialisation (Espirad, 2002).

➤ Exemple d'un procédé de fabrication d'un concentré des fruits *figure 33*.

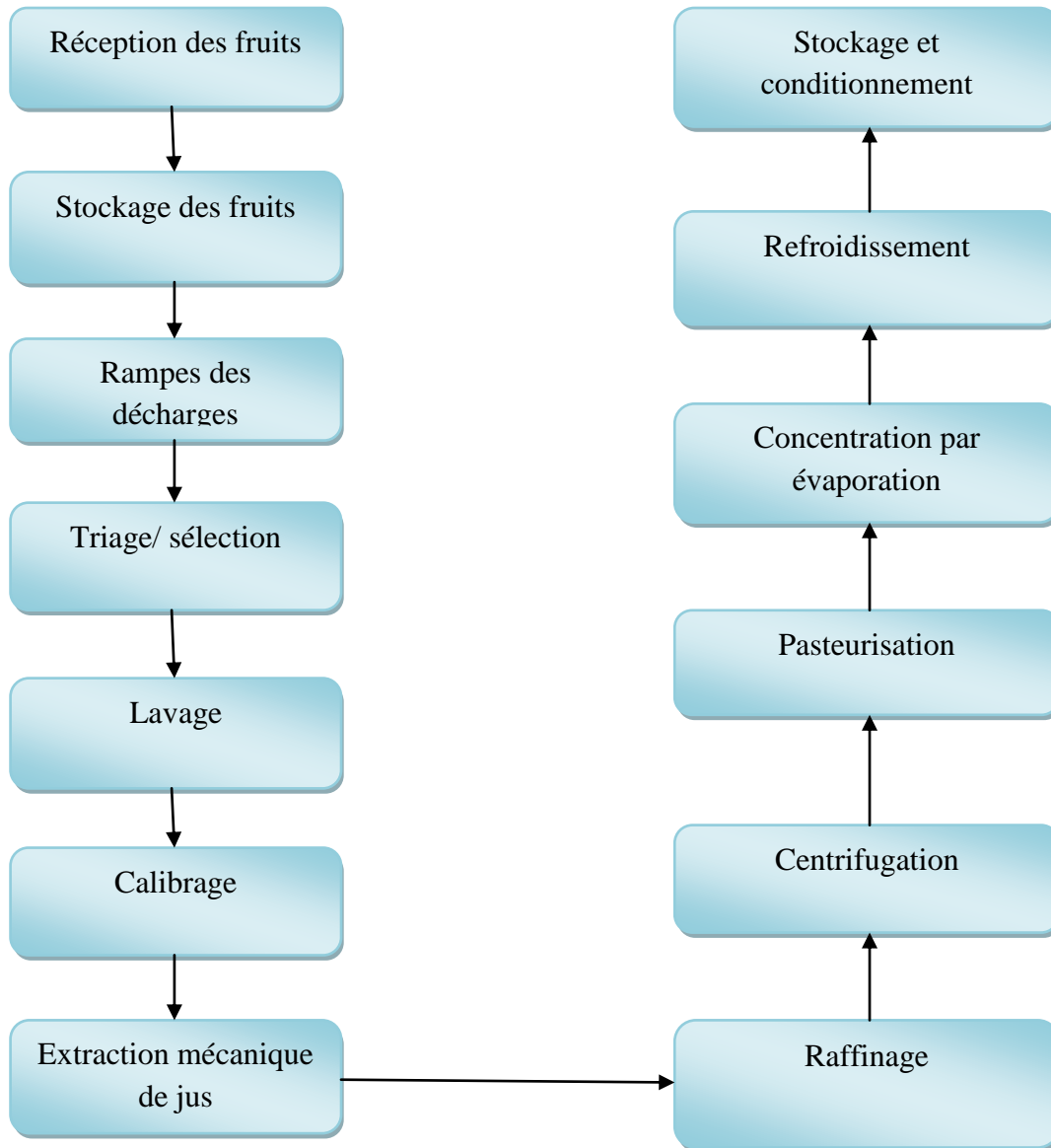


Figure 33 : étapes de fabrication d'un concentré de fruits.

- ✓ Après la fabrication de concentré, ce dernier passera par des étapes supplémentaires qui permettent d'obtenir un produit fini avec des caractéristiques déterminés.
- ✓ Le diagramme suivant (**figure 34**) représente le processus de fabrication de produit fini à partir de concentré de jus de fruits.

Jus de fruits

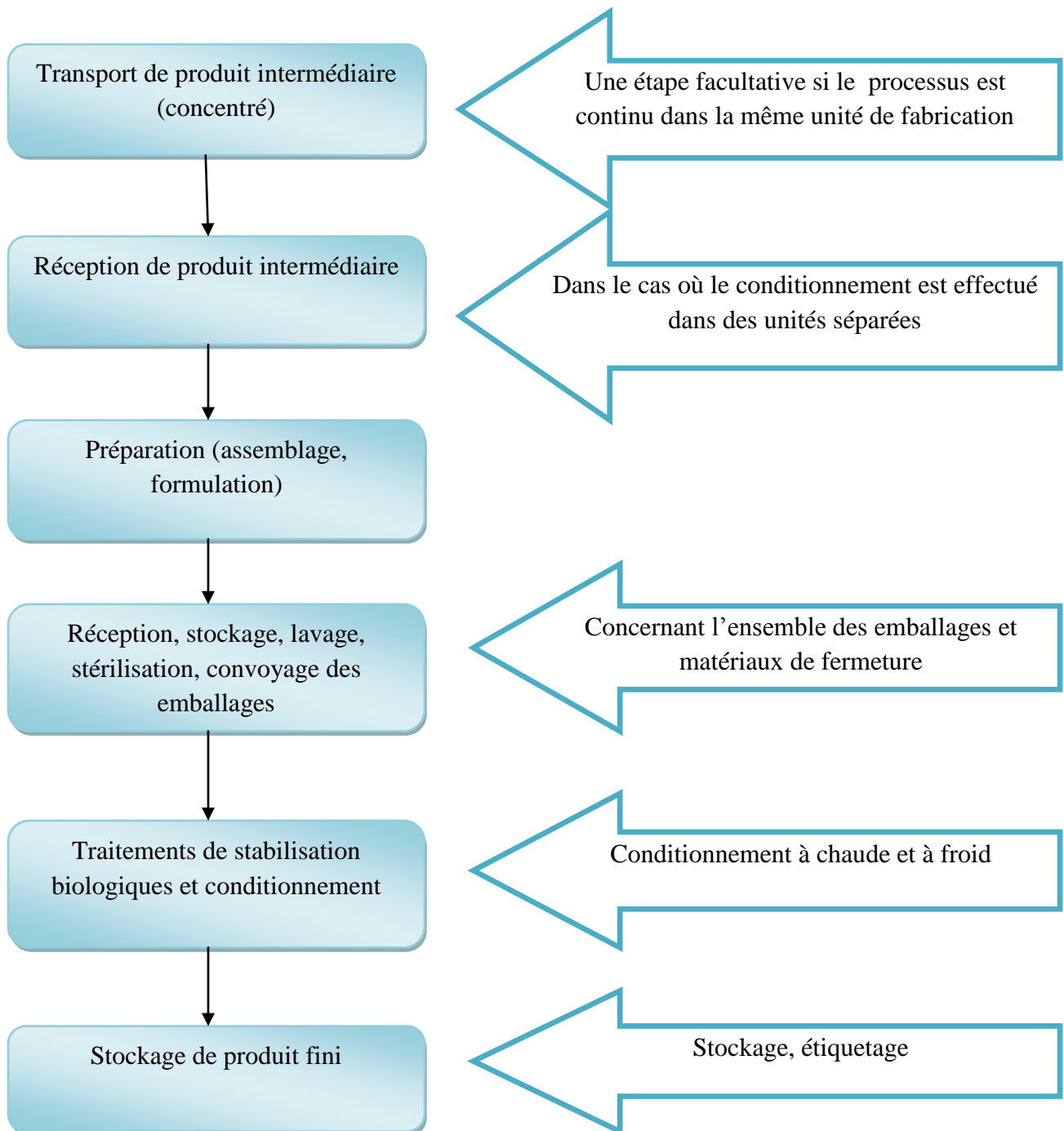


Figure 34 : processus de fabrication de produit fini à partir de concentré de jus de fruits.

V- Production des jus de fruits :

1- Production mondiale

Actuellement, la production mondiale de jus de fruits est de l'ordre de 40 milliards de litres. Au cours des dernières années, le taux de croissance annuel moyen est de 3%.

Les principaux pays producteurs de jus sont les suivants :

Chapitre III

Jus de fruits

Tableau 09 : Les principaux pays producteurs de jus de fruits (AIJN-Bruxelles).

Pays	Production en milliards de litres	Part en %
USA	8	20
Chine	5	12.5
Allemagne	3.5	9
Brésil	1	2.5
France	1	2.5
Angleterre	1	2.5
Espagne	1	2.5

Le jus d'oranges occupe la première place avec 36% de la production mondiale, suivi du jus de pomme avec 27%, et du jus de raisin avec 20%. La principale production des jus et concentrés provient des agrumes (l'orange en particulier). Le marché est dominé par le Brésil avec 17.000.000 de tonnes d'oranges, surtout l'Etat de Sao-Paulo. Les USA occupent la deuxième place avec 11.000.000 de tonnes d'oranges (essentiellement l'Etat de Floride). Il faut souligner que les USA ont subi au cours des dernières années des aléas climatiques ayant entraîné des destructions de plantations. Ces deux pays assurent plus de 70 % du marché mondial d'agrumes.

La différence principale réside dans le fait que le Brésil exporte 99% de sa production alors que 90% de la production en Floride sont consommées aux USA et seulement 10 % sont exportées.

2- Production nationale

Le marché algérien de jus et nectars de fruits connaît une forte croissance. Cette dernière s'accompagne d'une tendance vers une offre plus diversifiée et qualitatives. En 2007, la production nationale de jus et nectars de fruits estimée est de 150 à 170 millions de litres/ an. Les acteurs majeurs de la filière jus et nectars en Algérie sont : NCA, Vita jus, Jutop, Bon jus... etc. (Boiron A., Arvault G., 2008).

Le secteur industriel des boissons en Algérie est dominé par le secteur privé qui représente 94.6% des entreprises. Il affiche une croissance annuelle entre 8% et 9% depuis plusieurs années et couvre 98% des boissons nationaux.

Chapitre III

Jus de fruits

La production des boissons en Algérie estimée en 2008 est de près de 20 millions d'hectolitres, la **figure 35** représente une estimation de la production des différentes boissons produites en Algérie.

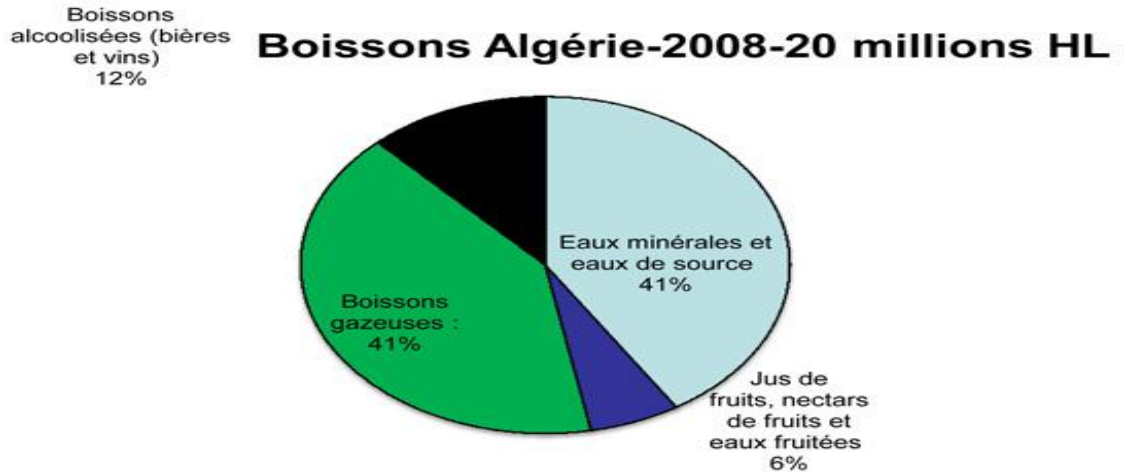


Figure 35 : estimation de la production des boissons en Algérie pour l'année 2008.

VI- Consommation des jus de fruits

1- Consommation mondiale

Selon une estimation réalisée par la fédération internationale des jus de fruits (I.F.U), la consommation mondiale de jus et nectar atteignait 33 milliards de litre en 1998 et passerait à 73 milliards dans une vingtaine d'année (**Guy et al, 2002**).

Le marché européen est le premier marché mondial du jus de fruits avec 10,7 milliards de litres consommés et la France est en deuxième position avec 16 % des volumes de vente en Europe, derrière l'Allemagne avec 26 % du marché européen en volume (**Anonyme, 2017a**).

Les plus grands consommateurs de jus de fruits sont désormais les États-Unis avec 35,7 litres par personne. L'Allemagne est à la deuxième place alors que leur consommation en 2005 était de 39,6 litres par personne. Les jus de fruits les plus consommés en Allemagne sont le jus de pommes (12,8 litres par personne et par an) suivi par le jus d'orange (8,9 litres par personne et par an). Le tableau ci-dessous représente les principaux pays consommateurs de jus de fruits.

Tableau10 : Les principaux pays consommateurs de jus de fruits (**Anonyme, 2017**).

Pays	Consommation litre/habit/an
USA	35.7
Allemagne	33.5

Chapitre III

Jus de fruits

Finlande	32.1
Australie	29.7
Espagne	28.6

2- Consommation nationale

La filière des jus et boissons du secteur agroalimentaire est l'une des plus dynamiques en Algérie. Le marché des jus et boissons passera, selon les prévisions des experts contenues dans une communication du ministère du commerce, présente lors d'une récente journée d'étude, de 12 millions d'hectolitres en 2003 à 19 millions d'hectolitres en 2008 (**Mourad, 2003**).

L'algérien consomme environ 17 litres de jus de fruits industriels annuellement contre 8 litres pour un Tunisien et 33 litres pour un libyen, et seulement 5 litres pour un marocain. D'année en année la quantité des boissons consommée connaît une hausse significative, La consommation de jus de fruits en Algérie progresse fortement, avec une croissance de 9% (**Nassima Benarab, 2014**). Le **tableau 11** résume les quantités de jus de fruits consommé à l'échelle nationale du 2010 à 2013.

Tableau 11: estimations sur la consommation nationale des jus de fruits. (***Mohammed K et autre, 2013**, ** **Nassima B, 2014**).

L'année	La consommation des jus de fruits à l'échelle national
2010	<ul style="list-style-type: none">Des études effectuées en 2010 par Cabinet Nielsen, estime que la consommation de jus de fruits, en Algérie était de l'ordre de 10 litres par habitant par an, soit 336 millions de litres.
2011	<ul style="list-style-type: none">Niveau de consommation 6 litres par tête (personne) par an ; avec un volume total en hl est de 2146000 hl.
2012	<ul style="list-style-type: none">Environ 2,4 milliards de litres ont été vendus sur l'ensemble du territoire national, pour une somme de 104,8 milliards de dinars.
2013	<ul style="list-style-type: none">La demande en jus de fruits est de 6,7 litres par personne et par an.

Chapitre IV



Notion des plans d'expériences

Chapitre IV

Notion des plans d'expériences

I- *Historique*

Réaliser des expériences afin d'étudier et de comprendre un phénomène est une démarche qui remonte à la nuit des temps. Dès le moyen-âge Nicolas Oresme (1325-1382) aborde cette question dans ses écrits. Inspirateur de Descartes et Leibnitz, Francis Bacon (1561-1626) est un des précurseurs de la méthode expérimentale. En 1627 il fait, par exemple, macérer des grains de blé dans neuf concoctions différentes afin d'étudier leur effet sur la rapidité de germination. Arthur Young (1746-1820) cherche ensuite à systématiser le procédé et aborde la notion de répétabilité des expériences afin de prendre en compte leur variabilité. Ses travaux concernent surtout l'agronomie et la mise en œuvre de méthodes "modernes" de culture, basées plus sur l'expérimentation que sur des préjugés ou l'habitude. Citons aussi les travaux de Cretté de Palluel (1741-1798) qui publie en 1788 un "*Mémoire sur les avantages et l'économie que procurent les racines employées à l'engrais des moutons à l'étable*". L'auteur propose un protocole expérimental destiné à comparer les mérites des pommes de terre, des turneps, de la betterave et de la chicorée dans l'engrais des moutons de l'étable. C'est ensuite principalement au 19^{ème} siècle que les méthodes expérimentales se démocratisent. Citons à titre d'exemple les expériences médicales menées par Claude Bernard (1813-1878) ainsi que son ouvrage "*Principes de médecine expérimentale*" (Walter. T, 2010).

Les méthodes rigoureuses d'expérimentation, basées sur l'utilisation des plans d'expériences, sont dues aux travaux de Sir Ronald Fisher (1890-1962). Ce brillant mathématicien, très productif dans le domaine de la Statistique, a été amené à s'intéresser aux techniques d'expérimentation suite à son emploi, en 1919, à la "Rothamsted Experimental Station", centre de recherche agronomique situé au nord de Londres. Il cherche alors à augmenter les rendements agricoles en combinant divers types d'engrais, de variétés végétales, de méthodes de cultures, de types de sols, etc... Face à l'impossibilité de réaliser la totalité des expériences ceci l'amène à proposer des configurations expérimentales basées sur des modèles statistiques rigoureux (tels que les carrés latins). Ceci constitue le point de départ de la méthode théorique des plans d'expérience (Walter. T, 2010).

Divers chercheurs ont par la suite marché dans les traces de Fisher afin de promouvoir et développer l'utilisation des techniques de planification expérimentales dans d'autres domaines que l'agronomie. Dès les années 50 les travaux de Box et de ses collaborateurs (principalement sur les surfaces de réponse) ont entraîné bon nombre d'applications pratiques.

Notion des plans d'expériences

Mais ce sont certainement les travaux de G. Taguchi qui ont permis une vaste diffusion des plans d'expériences, notamment dans le milieu industriel **(Walter. T, 2010)**.

II- *Définition*

Un plan d'expérience constitue une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences est basée sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats. **(Norme ISO 3535-3) (Linder R. 2005)**.

III- *Objectifs et intérêts des plans d'expériences*

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'interprétation de résultats expérimentaux avec un effort minimal sur le plan expérimental : la minimisation du nombre nécessaire d'expériences permet un gain en temps et en coût financier. Pour ce faire, la méthode vise à optimiser la démarche expérimentale. Les points centraux de la méthode consistent à :

- Choisir le nombre n d'essais.
- Définir et mettre au point la matrice d'expérience (M) qui indique dans quelles conditions chacun des n essais doit être réalisé.
- Choisir le modèle de régression (E) qui dirigera la méthode d'interprétation.

(E) et (M) sont très liés, la nature du modèle a une influence sur n donc sur (M). La donnée d'un plan d'expérience est la donnée d'une matrice (M) (et donc de n), et d'un modèle (E) **(Iboukhoulef. H, 2014)**.

IV- *Domaine d'application*

Les plans d'expériences apportent une aide notable aux expérimentateurs et constituent un outil indispensable à toute élaboration de stratégies expérimentales sans restriction disciplinaire. Parmi les industries pouvant utiliser cette méthodologie, on peut notamment citer :

- ✓ Industries chimique, pétrochimique et pharmaceutique;
- ✓ Industries mécanique et automobile;
- ✓ Industrie métallurgique **(Dr, Yahyaoui. I, 2015)**.

Notion des plans d'expériences

Exemples d'applications des plans d'expériences ;

- ✓ Formation d'un composé chimique, d'un aliment, d'un médicament...
- ✓ Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé.
- ✓ Optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un appareil de mesure.
- ✓ Minimisation des défauts d'une machine...

V- Terminologie

Ces plans d'expériences ont un vocabulaire et une terminologie qu'il est nécessaire de définir :

Réponse

On qualifie de réponse la grandeur qui est observée pour chaque expérience réalisée (**Walter. T, 2010**). En d'autres termes, c'est le résultat mesuré d'une étude. Sachant qu'à chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. L'ensemble de ces dernières, forme la surface de réponse. La valeur d'une réponse ne peut être modifiée que de manière indirecte en faisant varier les facteurs (**Boudissa F, 2011**).

Le choix de la ou des réponses est une étape capitale. Toute l'analyse et toutes les conclusions dépendent de ce choix. Une réponse mal adaptée au problème rendra l'expérimentation inutilisable ou conduira à des conclusions sans intérêt. La réponse sélectionnée doit permettre de répondre sans ambiguïté à la question posée. Ce choix n'est pas aussi simple que l'on pourrait le croire et c'est parfois la principale difficulté à laquelle on se heurte (**Goupy. J, Crighton. L, 2005**).

Facteur

Un facteur peut être toute variable obligatoirement contrôlable, pouvant influencer sur la réponse observée. La différence fondamentale entre la notion de variable et celle de facteur tient donc dans le fait que tout facteur doit pouvoir être modifié sans difficulté. La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau (**Boudissa F, 2011**).

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

❖ Facteurs continus

Notion des plans d'expériences

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

❖ Facteurs discrets

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

❖ Facteurs ordonnables

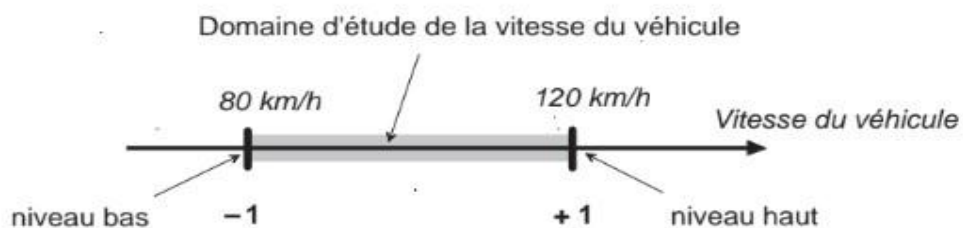
Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

❖ Facteurs booléens

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc (Goupy. J, Crighton. L, 2005).

✚ Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le *niveau bas*. La borne supérieure est le *niveau haut*. Si l'on étudie l'influence de la vitesse du véhicule sur la consommation (**figure 36**), celle-ci peut varier, par exemple, entre 80 et 120 km/h. La vitesse de 80 km/h est le niveau bas et la vitesse de 120 km/h est le niveau haut. C'est l'expérimentateur qui définit ces deux niveaux en fonction des spécificités de l'étude. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le *domaine de variation du facteur* ou plus simplement le domaine du facteur.



Notion des plans d'expériences

Figure 36 : domaine de variation de la vitesse est constitué de toutes les vitesses comprises entre 80 et 120 km/h. Le niveau bas du facteur est noté -1 et le niveau haut $+1$.

S'il y a plusieurs facteurs, chacun d'eux à son domaine de variation. Afin d'avoir une représentation commune pour tous les facteurs, on a l'habitude d'indiquer les niveaux bas par -1 et les niveaux hauts par $+1$. La vitesse de 80 km/h est le niveau -1 et celle de 120 km/h est le niveau $+1$.

Espace expérimental

Pour présenter l'espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques. Il est ensuite facile d'étendre les notions introduites à des espaces multidimensionnels.

Un facteur continu peut être représenté par un axe gradué et orienté. S'il y a un second facteur continu, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté.

Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental(**figure 37**) L'espace expérimental comprend tous les points du plan « facteur 1 \times facteur 2 » et chacun d'eux représente une expérience.



Figure 37 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

S'il y a un troisième facteur, on le représente aussi par un axe orienté et gradué, et on le positionne perpendiculairement aux deux premiers. À partir de quatre facteurs, on opère de même, mais il n'y a plus de représentation géométrique possible et l'on doit adopter une

Notion des plans d'expériences

représentation purement mathématique de l'espace expérimental qui est un hyper volume à quatre dimensions.

✚ Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le *domaine d'étude* (Figure 38). Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs.

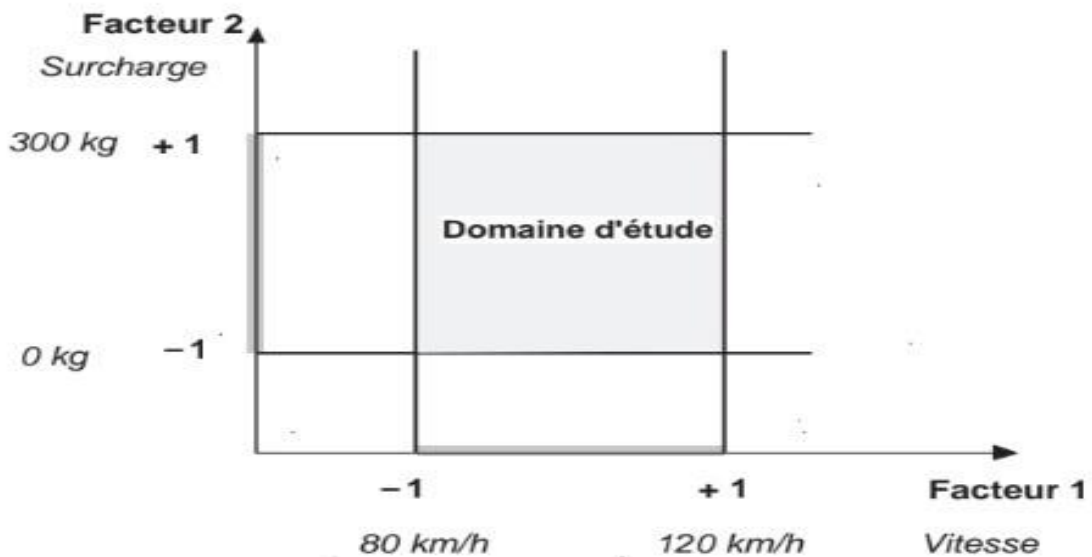


Figure 38 : domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs.

Supposons que le second facteur soit la surcharge du véhicule définie comme toute masse supplémentaire à celle du véhicule et du chauffeur. Le niveau bas de la surcharge est 0 kg et le niveau haut 300 kg, par exemple. S'il n'y a pas de contraintes, le domaine d'étude est représenté par tous les points dont les surcharges sont comprises entre 0 et 300 kg et dont les vitesses sont comprises entre 80 et 120 km/h (Goupy, J, Crighton, L, 2005).

✚ Variables centrées réduites

Soit A, la variable naturelle ou réelle dont le niveau bas A- correspond à la variable normée -1 et le niveau A+ à +1.

La valeur centrale ou milieu du domaine est :

$$A_0 = \frac{A^+ + A^-}{2}$$

On introduit également la notion du pas :

$$\text{Pas} = \frac{A^+ - A^-}{2}$$

Le passage des variables d'origines A aux variables codées notées X est donnée par :

$$X = \frac{A - A_0}{\text{Pas}}$$

Notion des plans d'expériences

✚ Matrice d'expérience

Une matrice d'expérience est un objet mathématique qui représente l'ensemble des expériences à réaliser. Elle est toujours écrite sous forme codée. Elle est constituée de N lignes correspondants au nombre d'expériences et K colonnes correspondantes au nombre de variables (**figure 39**). Dans une matrice donnée un élément X_{ij} correspond au niveau de la I^{ème} et de la J^{ème} variable.

Essai n°	Vitesse Facteur 1	Surcharge Facteur 2
1 (A)	-1	-1
2 (B)	+1	-1
3 (C)	-1	+1
4 (D)	+1	+1
Niveau -1	80 km/h	0 kg
Niveau +1	120 km/h	300 kg

Essai n°	Vitesse Facteur 1	Surcharge Facteur 2
1 (A)	80 km/h	0 kg
2 (B)	120 km/h	0 kg
3 (C)	80 km/h	300 kg
4 (D)	120 km/h	300 kg

Figure 39 : exemple d'une matrice d'expériences.

✚ Plan d'expérimentation

Un plan d'expérimentation correspond à la « traduction » de la matrice d'expérience en une matrice directement utilisable par l'expérimentateur, car les variables seront exprimées en variables naturelles. Le plan d'expérimentation doit faire l'objet d'une analyse minutieuse pour voir si toutes les expériences sont réalisables et si elles ne présentent aucun risque.

VI- *Méthodologie de mise en place d'un plan d'expériences*

L'originalité de la méthode des plans d'expériences est sa globalité dans le sens où elle commence au niveau 0 de l'expérimentation c'est-à-dire la position du problème ; elle contingente la réalisation des essais et se poursuit jusqu'à la conclusion de l'étude. On peut, pour mettre en place un plan d'expérience, considérer les étapes suivantes :

- ✓ Définition de l'objectif.
- ✓ Choix des réponses expérimentales.
- ✓ Choix des facteurs et du domaine expérimental d'intérêt.
- ✓ Etablir la stratégie expérimentale.

Notion des plans d'expériences

- ✓ Construction de la matrice d'expériences.
- ✓ Construction du plan d'expérimentation.
- ✓ Expérimentation.
- ✓ Calcul des estimations des informations recherchées.
- ✓ Interprétation des résultats (**Iboukhoulef. H, 2014**).

VII- *Différents types de plans d'expériences utilisés*

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- ✓ Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres.
- ✓ Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

1. PLANS FACTORIELS COMPLETS A DEUX NIVEAUX

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

➤ **Plan à deux facteurs**

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré. Par exemple, la **figure 40** représente un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + e$$

- y est la réponse
- x_i représente le niveau attribué au facteur i .
- a_0 est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- a_1 est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.
- a_2 est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.
- a_{12} est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.
- e est l'écart.

Notion des plans d'expériences

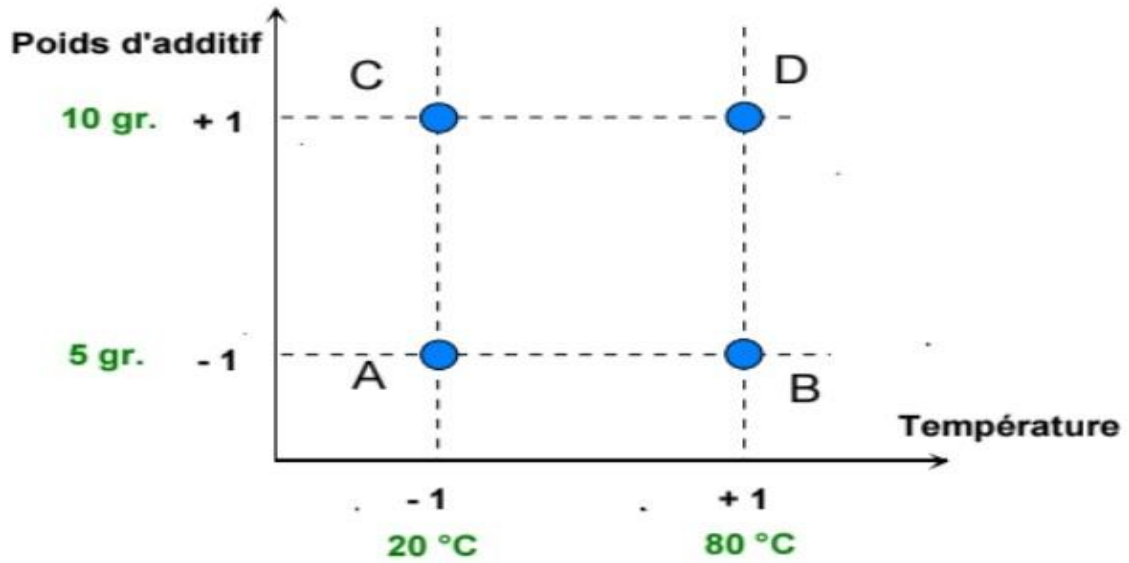


Figure 40 : meilleurs emplacements des points expérimentaux sont les sommets du domaine d'étude lorsque le modèle postulé est du premier degré.

➤ Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation suivante :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ijz} x_i x_j \dots x_z + e$$

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k.

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

On remarquera que cette notation indique également le nombre d'essais à réaliser. Ce nombre devient rapidement très important. Pour seulement 7 facteurs, il faudrait exécuter 128 essais. Pour diminuer le nombre des essais en conservant la possibilité d'étudier tous les facteurs, les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux ont été introduits (Goupy, J, 2006).

2. PLAN FACTORIEL FRACTIONNAIRES A DEUX NIVEAUX (2^q - q)

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs, mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire a 2 fois moins ou 4 fois moins ou 2q fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant. À la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de

Notion des plans d'expériences

n équations à p inconnues avec p plus grand que n . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les inconnues et on résout le système pour ces groupes d'inconnues. On appelle ces groupes d'inconnues des contrastes et on dit que les inconnues sont aliées dans les contrastes.

➤ Notation des plans factoriels fractionnaires

Pour k facteurs prenant deux niveaux, le plan complet est noté 2^k . Le plan fractionnaire, moitié du plan complet (**figure 41**), possède $\frac{1}{2} \cdot 2^k$ ou 2^{k-1} essais. On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

- Le k signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.
- Le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par 2.

Un plan 2^{5-2} permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par $2^2 = 4$. Un plan 2^{k-q} permet d'étudier k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par 2^q .

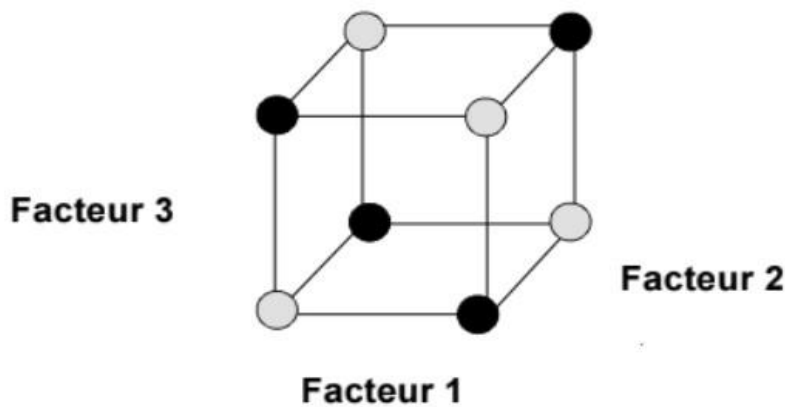


Figure 41 : plan factoriel complet 2^3 peut être divisé en deux plans factoriels fractionnaires 2^{3-1} , un plan noir et un plan gris (Goupy, J, 2006).

3. AUTRES PLANS A DEUX NIVEAUX

Les plans factoriels complets et fractionnaires sont basés sur des modèles mathématiques du premier degré. Ils couvrent la plupart des besoins des expérimentateurs lors d'une étude de dégrossissage. Ce sont eux qui sont employés dans la majorité des cas. D'autres plans à deux niveaux, et basés également sur un modèle mathématique du premier degré, ont été mis au

Notion des plans d'expériences

point pour répondre à des situations particulières. Nous examinerons les plans de **Koshal**, les plans de **Rechtschaffner**, les plans de **Plackett et Burman**, les **Tables de Taguchi** et les **plans sursaturés**.

➤ Plans de Koshal

Les plans de Koshal sont des plans qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs. On ne peut pas évaluer les interactions. Le modèle mathématique est :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i$$

Ces plans, peu connus, sont très pratiques pour dégrossir un problème. Ils offrent l'avantage de donner directement l'effet des facteurs. Ils forment le début d'un plan factoriel qu'il est toujours loisible de compléter pour obtenir un plan complet ou fractionnaire. La **figure 42** illustre un plan de Koshal pour 3 facteurs.

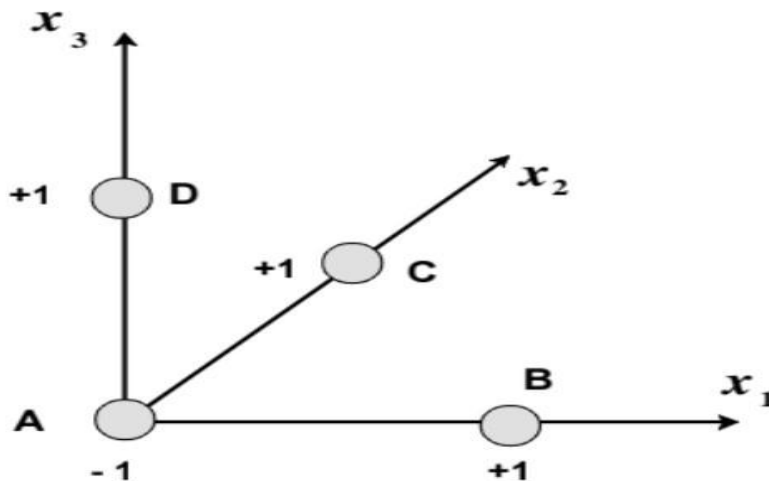


Figure 42 : Plan de Koshal pour trois facteurs. Ces points forment le début d'un plan factoriel complet 2^3 .

➤ Plans de Rechtschaffner

Les plans de Rechtschaffner sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux. Toutes les autres interactions sont supposées nulles avant même l'expérimentation. Le modèle mathématique adopté au départ de l'étude est donc :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j$$

Notion des plans d'expériences

Il suffit de choisir un plan fractionnaire de résolution III pour obtenir un plan de Rechtschaffner.

➤ Plans de Plackett et Burman

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman sont des matrices d'Hadamard. C'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes etc. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement $2k$ lignes (4, 8, 16, 32, etc.).

Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent saturés. Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction analogue à celui des plans de Koshal ; $Y = a_0 + \sum a_i x_i$.

➤ Tables de Taguchi

Les Tables de Taguchi sont des plans de Plackett et Burman dans lesquels on a remplacé +1 par 1 et -1 par 2. Les noms des plans ont également été traduits. Le plan 23 est la Table L8 et le plan 24 est la Table L16. Le plan de 12 essais, appelé Table L12, est un plan de Plackett et Burman. A l'origine ces plans étaient utilisés avec un modèle sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique. La présentation des plans d'expériences selon les principes de Taguchi est très prisée dans le domaine de la qualité (**Goupy. J, 2006**).

➤ Plans sursaturés

Un plan sursaturé est un plan qui comporte moins d'essais que de coefficients à déterminer dans le modèle mathématique. A ce titre les plans factoriels fractionnaires peuvent être considérés comme sursaturés. Mais, il existe des plans encore plus sursaturés que les plans factoriels fractionnaires. Ce sont des plans dont les facteurs principaux sont aliasés entre eux. Ces plans sont utiles lorsqu'il y a beaucoup de facteurs à examiner et lorsqu'on est sûr que peu d'entre eux sont influents sur la réponse. Certains plans proposent l'étude de 66 facteurs en 12 essais ou de 272 facteurs en 24 essais (**Goupy. J, 2006**).

4. PLANS A PLUSIEURS NIVEAUX

Les plans à deux niveaux sont très utilisés parce qu'ils sont économiques en nombre d'essais. Mais il n'y a aucune raison de ne pas considérer des plans ayant des facteurs prenant

Notion des plans d'expériences

plus de deux niveaux. Il faut donner à chaque facteur le nombre de niveaux nécessaires aux exigences de l'étude.

➤ Carrés latins

Les carrés latins sont des plans pour étudier 3 facteurs prenant chacun 3 niveaux. On réalise 9 essais au lieu de 27 pour le plan complet. Ce sont des plans fractionnaire 3^3-1 . La disposition des points expérimentaux est telle que tous les niveaux sont représentés et qu'il n'y a pas de répétition. La **figure 43** illustre un carré latin pour 3 facteurs. Ces plans sont souvent utilisés pour les variables discrètes et le modèle mathématique est souvent un modèle sans interaction.

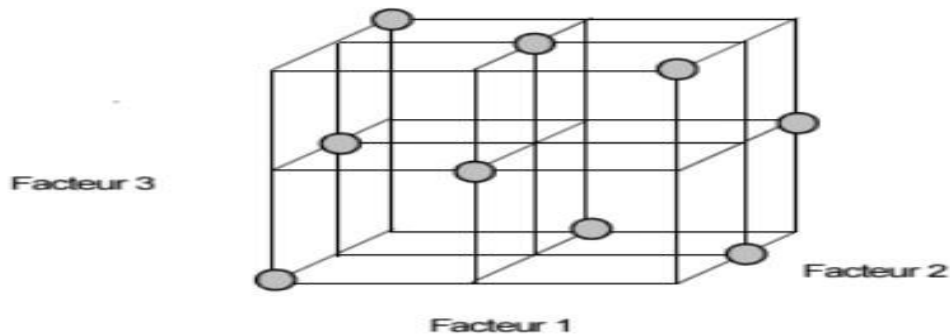


Figure 43 : Plan en carrés latins.

➤ Carrés gréco-latins

Les carrés gréco-latins sont des plans de 16 essais permettant d'étudier 4 facteurs ayant chacun 4 niveaux. Ce sont des plans 4^4-2 . L'emplacement des points expérimentaux est tel que la matrice de calcul est orthogonale. Ces plans sont utilisés pour les variables discrètes et le modèle mathématique est un modèle avec ou sans interaction d'ordre 2.

➤ Carrés de Youden

Youden a développé des plans pour deux variables discrètes prenant plus de quatre niveaux. Le principe est analogue à celui des carrés latins. On réduit le nombre des essais en retirant des points au plan complet. Ces plans sont souvent utilisés pour les variables discrètes. Ils ont servi également de base à l'établissement de plans pour simulations numériques (Goupy, J, 2006).

Notion des plans d'expériences

5. PLANS POUR SURFACES DE REPONSE

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs, on a : $\mathbf{Y} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1\mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_2\mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_{12}\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_1\mathbf{x}_1^2 + \mathbf{a}_2\mathbf{x}_2^2 + \mathbf{e}$

➤ Plans composites

Un plan composite est constitué de trois parties :

- Un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux.
- Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
- Des *points axiaux*. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs.

La **figure 44** représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan 22. Le point E est le point central. Ce point peut avoir été répliqué une ou plusieurs fois. Les points F, G, H et I sont les points axiaux. Ces quatre derniers points forment ce que l'on appelle *le plan en étoile*. On réalise 9 essais et 6 coefficients doivent être déterminés. Il faut donc résoudre un système de 9 équations à 6 inconnues (**Goupy, J, 2006**).

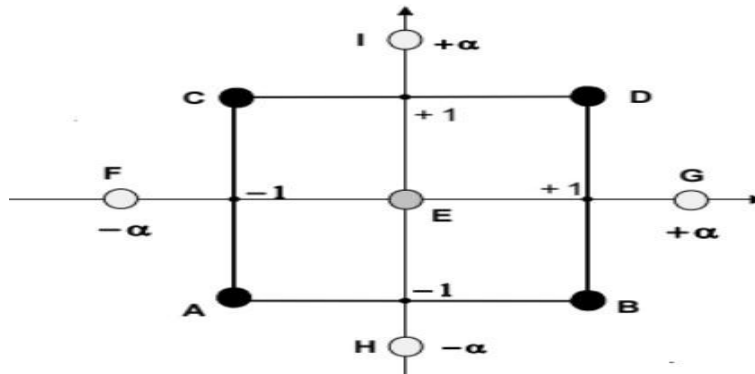


Figure 44: Plan composite pour deux facteurs.

➤ Plans de Doehlert

La caractéristique principale des plans de Doehlert est d'avoir une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental. La **figure 45** donne la disposition de ces points pour un plan à deux facteurs (essais 1 à 7). Tous les points sont à la même distance

Notion des plans d'expériences

du centre du domaine d'étude et sont situés sur le cercle trigonométrique. Ils forment un hexagone régulier.

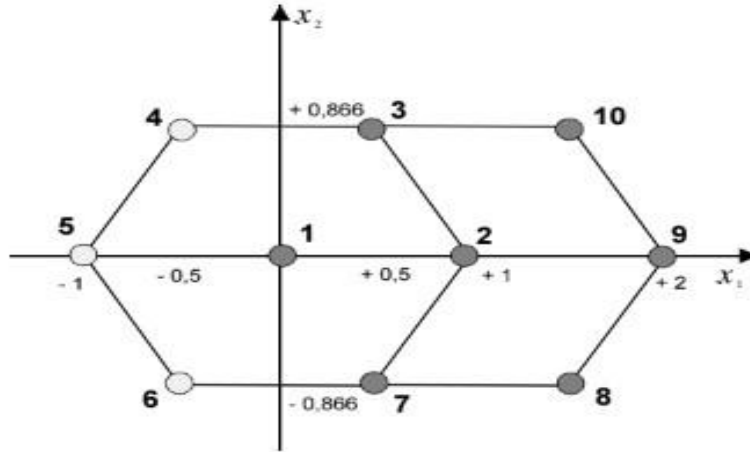


Figure 45: Plan de Doehlert.

Les points 1 à 7 illustrent un premier plan de Doehlert. Les trois points 8, 9 et 10 illustrent les expériences supplémentaires. Les points 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1 illustrent un deuxième plan de Doehlert (Goupy, J, 2006).

➤ Plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (figure 46). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central.

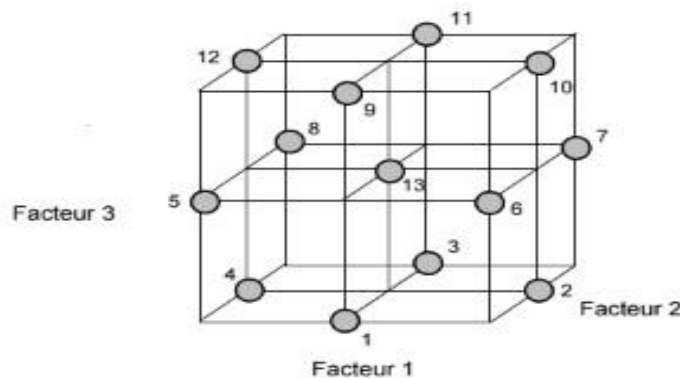


Figure 46 : Plan de Box- Behnken pour trois facteurs.

La matrice du **tableau 12** indique ces douze essais accompagnés d'un seul point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre.

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère (ou une hyper sphère)

Chapitre IV

Notion des plans d'expériences

centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'iso variance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs.

Tableau 12 : matrice expérimental de plan de Box-Behnken pour trois facteurs.

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	0	-1	-1
2	1	0	-1
3	0	1	-1
4	-1	0	-1
5	-1	-1	0
6	1	-1	0
7	1	1	0
8	-1	1	0
9	0	-1	1
10	1	0	1
11	0	1	1
12	-1	0	1
13	0	0	0

➤ Plans de Rechtschaffner pour le second degré

Les plans de Rechtschaffner permettant d'établir un modèle du second degré sont des plans saturés. S'il y a k facteurs, il faut effectuer un nombre, N , d'essais égal à

$$N = \frac{1}{2} (2 + 3k + k^2)$$

La construction de ces plans est indiquée dans l'article original (Goupy, J, 2006).

➤ Plans de D-optimaux

Les contraintes expérimentales ne permettent pas toujours d'être dans les conditions idéales des plans d'expériences précédemment décrits. Par exemple, les réglages de l'appareil ne permettent pas d'atteindre les niveaux préconisés par la théorie ou des combinaisons de niveaux peuvent se révéler dangereuses : réaction explosive pour les chimistes, concentration toxique pour les médecins, etc. Dans cette situation, il est extrêmement commode d'utiliser les

Notion des plans d'expériences

plans D-optimaux. Le choix de l'emplacement des points expérimentaux nécessite alors un logiciel de plans d'expériences. Il suffit de préciser le nombre d'expériences que l'on désire effectuer et le modèle a priori. Le logiciel calcule alors, grâce à un algorithme d'échange, le plan le mieux adapté à l'étude (Goupy, J, 2006).

6. PLANS DE MELANGES

Les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part.

Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants. Par exemple, la concentration d'un produit doit être au moins de x pour-cent ou cette concentration ne peut excéder une valeur donnée. En fonction de ces contraintes la planification de l'étude est modifiée et elle doit être adaptée à chaque cas.

Si l'on note par x_i la teneur en constituant i , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait la relation :

$$\sum x_i = 100\% ; n < i < 1$$

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité on a :

$$\sum X_i = 1 ; n < i < 1$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges.

La contrainte fondamentale des mélanges fait disparaître la constante et les termes du second degré se réduisent aux termes rectangles. Pour trois composants, le modèle du premier degré est donc :

$$Y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

Et pour le second degré :

Chapitre IV

Notion des plans d'expériences

$$Y = \sum b_i x_i$$

Les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes de celles utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

On utilise un triangle équilatéral pour représenter les mélanges à trois composants. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral. Les mélanges binaires sont représentés par les cotés du triangle. Par exemple, le côté gauche du triangle (**figure 47**) représente les mélanges composés uniquement des produits A et B.

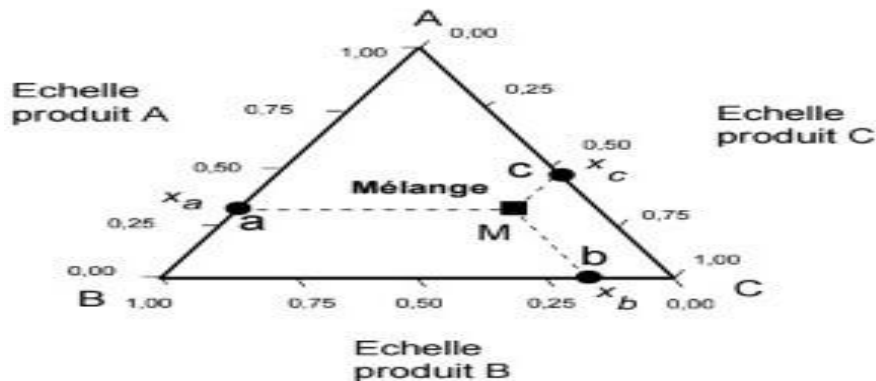


Figure 47 : Représentation des mélanges à trois constituants sur un triangle équilatéral.

Un point de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange tertiaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle. Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent que la contrainte fondamentale des mélanges est bien respectée.

La représentation des mélanges à quatre constituants est un tétraèdre régulier (**figure 48**). S'il y a plus de quatre constituants, il faut faire appel à des hyper polyèdres réguliers.

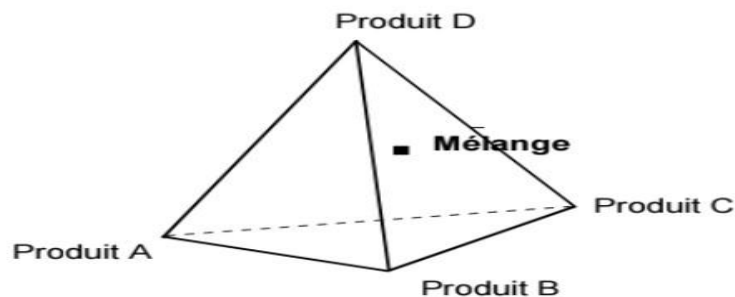


Figure 48 : Représentation des mélanges à quatre constituants par un tétraèdre régulier.

Notion des plans d'expériences

Il existe plusieurs manières de disposer les points expérimentaux dans le domaine d'étude (**figure 49**): Plans de mélanges en réseaux (Simplex Lattice design), plans de mélanges centrés (Simplex-Centroid Designs), plans de mélanges centrés augmentés (Augmented Simplex-Centroid Designs).

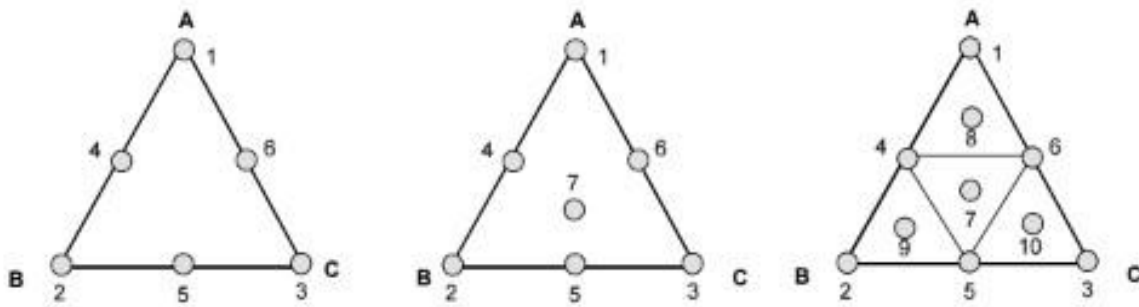


Figure 49 : Plan de mélanges en réseaux (à gauche), plan de mélanges centrés (au milieu), plan de mélanges centrés augmentés (à droite).

➤ Plans de mélange et plan d'expériences

Il est tout à fait possible de traiter à la fois des variables de mélanges (les proportions des constituants) et des facteurs de plan d'expériences. Pour illustrer cette situation on peut prendre l'exemple d'un fabricant de chocolat. L'étude de la composition du chocolat donne lieu à un plan de mélanges et les conditions de préparation donnent lieu à un plan d'expériences factoriel ou du second degré. A chaque point d'expériences du plan factoriel, il faut réaliser un plan de mélanges (**figure 40**). On a donc rapidement un grand nombre d'essais à réaliser puisqu'il faut faire np essais si le plan de mélange à n essais et le plan d'expériences p essais (**Goupy, J, 2006**).

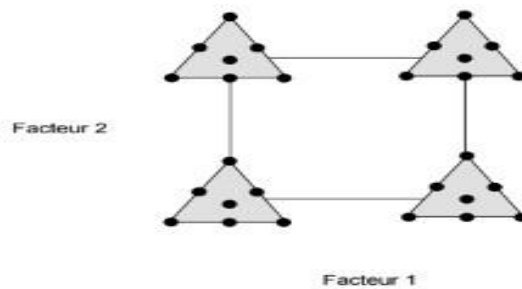


Figure 50 : Représentation de l'étude d'un mélange à trois constituants soumis à deux facteurs.

7. PLANS BOOLEENS

Il n'est pas toujours possible d'exploiter les résultats d'un plan d'expériences avec les outils classiques : régression multilinéaire pour les variables continues ou analyse de la variance pour les variables discrètes. Si les facteurs d'étude sont des variables booléennes, c'est-à-dire ne prenant que deux valeurs, il faut trouver la fonction booléenne, ne prenant elle-même que deux valeurs, en fonction des valeurs des variables.

Les plans booléens ressemblent aux plans factoriels à deux niveaux mais l'interprétation mathématique est complètement différente puisque la nature des variables est différente. Chaque essai permet de connaître la valeur d'un minterm (ou d'un maxterm). L'ensemble de tous les minterms donne la forme canonique de la fonction cherchée. La forme canonique est ensuite simplifiée grâce à l'une des méthodes classiques de simplification des fonctions booléennes (Méthode de Veitch, Harvard ou Quine) (**Goupy, J, 2006**).

8. PLANS POUR SIMULATIONS NUMERIQUES

Lorsque les expérimentations sont coûteuses, il arrive de plus en plus fréquemment que l'on étudie d'abord les phénomènes à l'aide de simulations numériques. Les calculs sont souvent complexes et nécessitent des temps de calcul très longs. Il est alors avantageux d'organiser les simulations de la même manière que les essais des plans d'expériences. Mais deux particularités des calculs numériques doivent être prises en compte. La première est l'absence d'erreur expérimentale et la deuxième est la complexité des modèles a priori permettant l'interprétation des résultats (**Goupy, J, 2006**).

VIII- *Logiciels pour les plans d'expérience*

L'outil informatique est nécessaire à la réalisation rapide et précise d'une étude menée à l'aide d'un plan d'expérience. Ceci peut être utile tout d'abord pour bénéficier d'une assistance à la création du plan d'expérience (plan classique, plans optimaux, *etc...*), puis pour réaliser tous les calculs fastidieux (recherche des estimateurs, tests d'hypothèses, *etc...*) et enfin pour obtenir tous les types de sorties conviviales existant (diagrammes de Pareto, représentations graphiques des surfaces de réponses, *etc...*).

Il est enfin possible d'utiliser des logiciels directement spécialisés dans la problématique des plans d'expérience. Il s'agit le plus souvent de modules particuliers des logiciels de statistique présentés précédemment. Pour reprendre l'exemple du logiciel **SAS** le module SAS/QC (dédié

Chapitre IV

Notion des plans d'expériences

au contrôle de la qualité) permet d'avoir accès à de multiples procédures relatives à la construction de plans d'expérience.

Il existe cependant un logiciel en langue française, **Nemrod**, qui est exclusivement dédié à la construction et l'analyse des plans d'expérience. Il présente de plus l'avantage d'être continuellement amélioré par une équipe active dans la "méthodologie de la recherche expérimentale" (<http://www.nemrodw.com>). Ses points forts sont de plus les plans d'expériences pour mélanges ainsi que les sorties graphiques très claires (2D et 3D simultanées) (Walter. T, 2010).

Nous indiquons ci-dessous les principaux logiciels de plans d'expériences et les sites internet correspondants. Quelques uns d'entre eux mettent à disposition des personnes intéressées des versions de démonstration et certains des versions complètes simplement limitées dans le temps (Goupy. J, 2006).

Tableau 13 : Principaux logiciels de plans d'expériences.

JMP	http://www.jmpdiscover.com .
Minitab	http://www.minitab.fr
Statistica	http://www.intsoft.com/product/Tech/Statistica
Statgraphics	http://www.simapplus.fr
Unscrambler	http://www.camo.no
Pirouette	http://www.infometrics.com
Modde	http://www.umetrics.com

Chapitre V



Matériels et méthodes

Chapitre V

Matériels et méthodes

Le but de notre travail est l'optimisation des paramètres physicochimique d'une boisson de type jus de fruits de différentes concentrations en jus de tomate combinés avec un jus de citron pur, par la réalisation d'un plant dit plant D-optimale, utilisant un logiciel appelé « MODDE6 ». Cette expérimentation a été effectuée au niveau de Laboratoire d'analyses physico-chimiques du département Génie des procédés université A. MIRA Bejaia de 09/05/2021 jusqu'au 21/06/2021.

I- Principe

Le principe de l'étude expérimentale est comme suit :

- ✚ Préparation et extraction de jus de tomate.
- ✚ Préparation et extraction de jus de citron.
- ✚ . La formulation des différentes boissons en variant les teneurs des deux jus (jus de tomate + jus de citron), on se réfère à un tableau donné par le MODDE6.
- ✚ Analyses physico-chimiques des boissons formulées.
- ✚ Obtention d'un optimum par des plans d'expériences.
- ✚ Caractérisation physicochimique de la boisson optimale.
- ✚ Réalisation d'un test de dégustation pour confirmer l'acceptabilité de produit par le consommateur.

II- Matériels

1- Matériels de laboratoire

La verrerie (les béchers, erlenmyers, burettes, pipettes, fioles jaugées, flacons), les appareils (spectrophotomètre, bain marie, une micropipette, réfractomètre, agitateur, thermomètre, la balance, réfrigérateur, pH mètre et un viscosimètre), ainsi que les réactifs nécessaire pour la réalisation des différentes analyses physicochimiques (acide oxalique 1%, le DPPH, le DCPIP, acide ascorbique, phénolphtaléine, solution NaOH à 0.1 normalité, réactif de Folin-Ciocalteu, acide gallique, l'éthanol, carbonate de sodium à 10% et l'eau distillé).

2- Matières premières

- ✓ Les échantillons de tomates ont après être laver, débarrasser de leur peau et pépins puis coupés en petits cubes en suite stockés au réfrigérateur à 4C° jusqu'au moment de leur utilisation aux analyses et transformation en boissons.
- ✓ Après triage et lavage, le citron est stocké au réfrigérateur à 4C°.

III- Méthodes

1- Préparation des ingrédients :

Préparation de jus de tomate :

Les fruits ont été nettoyés, lavés à l'eau, puis coupés en deux afin d'extraire les pépins, la partie comestible a été coupée en cubes de 2 à 3 cm, conditionnés dans des bocaux en verre et stockés au congélateur à une température de 4 C° jusqu'au moment de leur utilisation. Pour la fabrication de jus, les bocaux subissent un chauffage de 75C° pendant 10 min dans un bain marie pour les broyer à chaud à l'aide d'un mixeur. Le jus est ensuite stérilisé à 110 C° pendant quelques secondes, refroidi et stocké à 4C° *figure 51*.

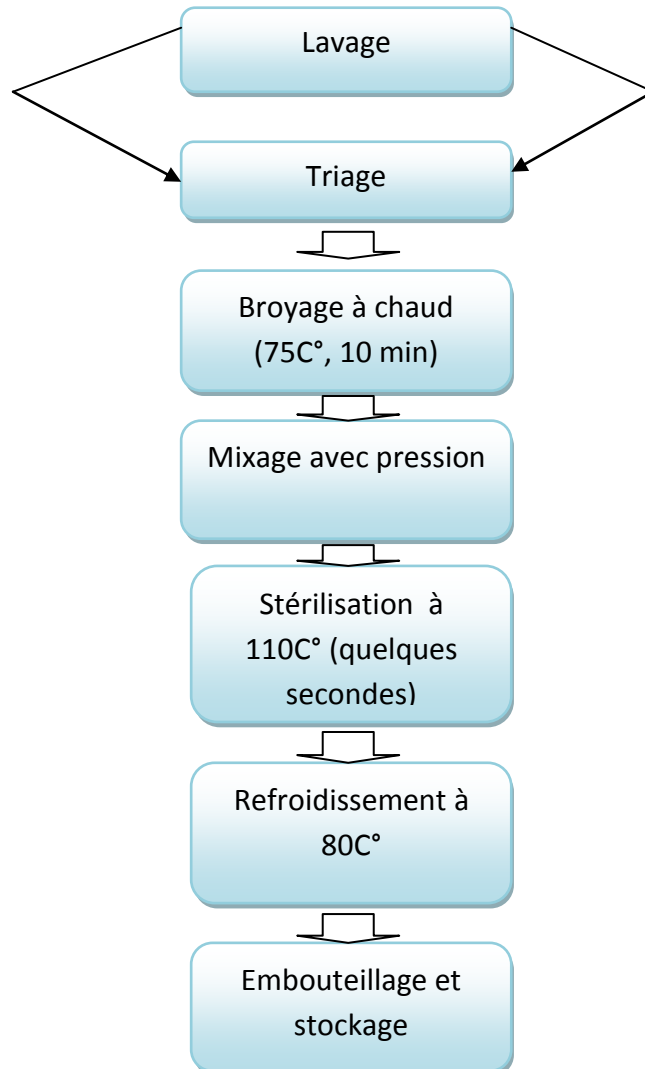


Figure 51 : diagramme de fabrication d'un jus de tomate.

Chapitre V

Matériels et méthodes

✚ Préparation d'un jus de citron :

Les fruits ont été nettoyés, lavés à l'eau, pressés puis soumis à une filtration ensuite pasteurisé dans un bain marie réglé a une température de 75C° pendant 10 min, par la suite le jus préparé est conditionné dans des bouteilles en verre pasteurisés et conservés à une température de 6°C *figure 52*.

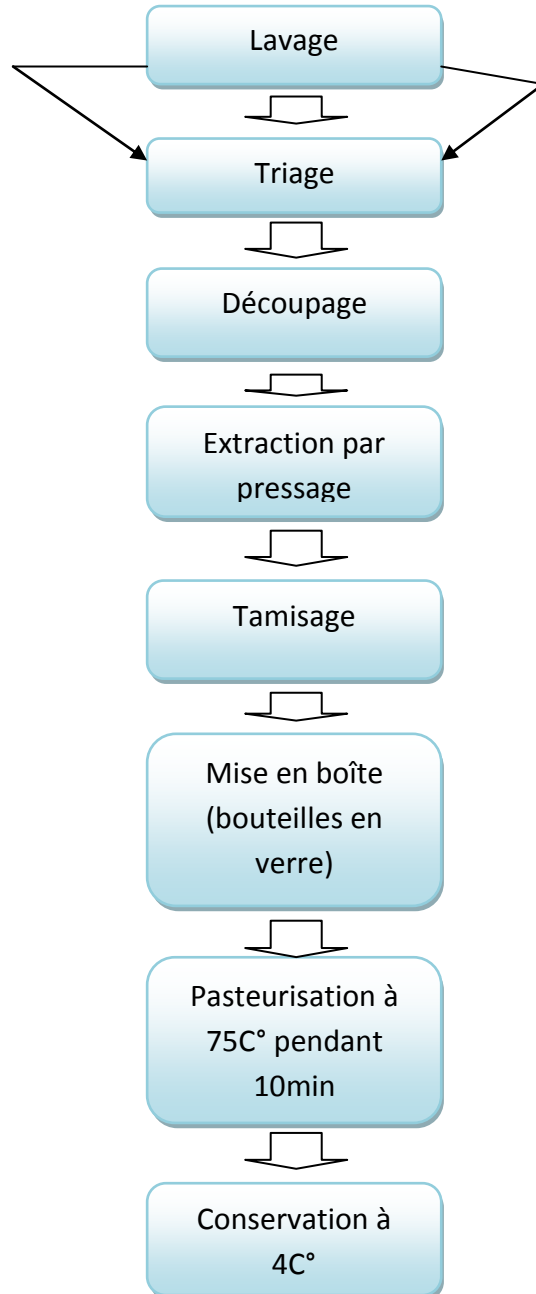


Figure 52 : diagramme de fabrication d'un jus de citron.

Chapitre V

Matériels et méthodes

Ingrédients utilisés pour les formulations des boissons

- ✓ **Sel** : sel de cuisine séché iodé « OASISEL ».
- ✓ **Sucre** : le saccharose de cèval.

2- *Formulation de jus* : la **figure 53** représente les étapes de la formulation.

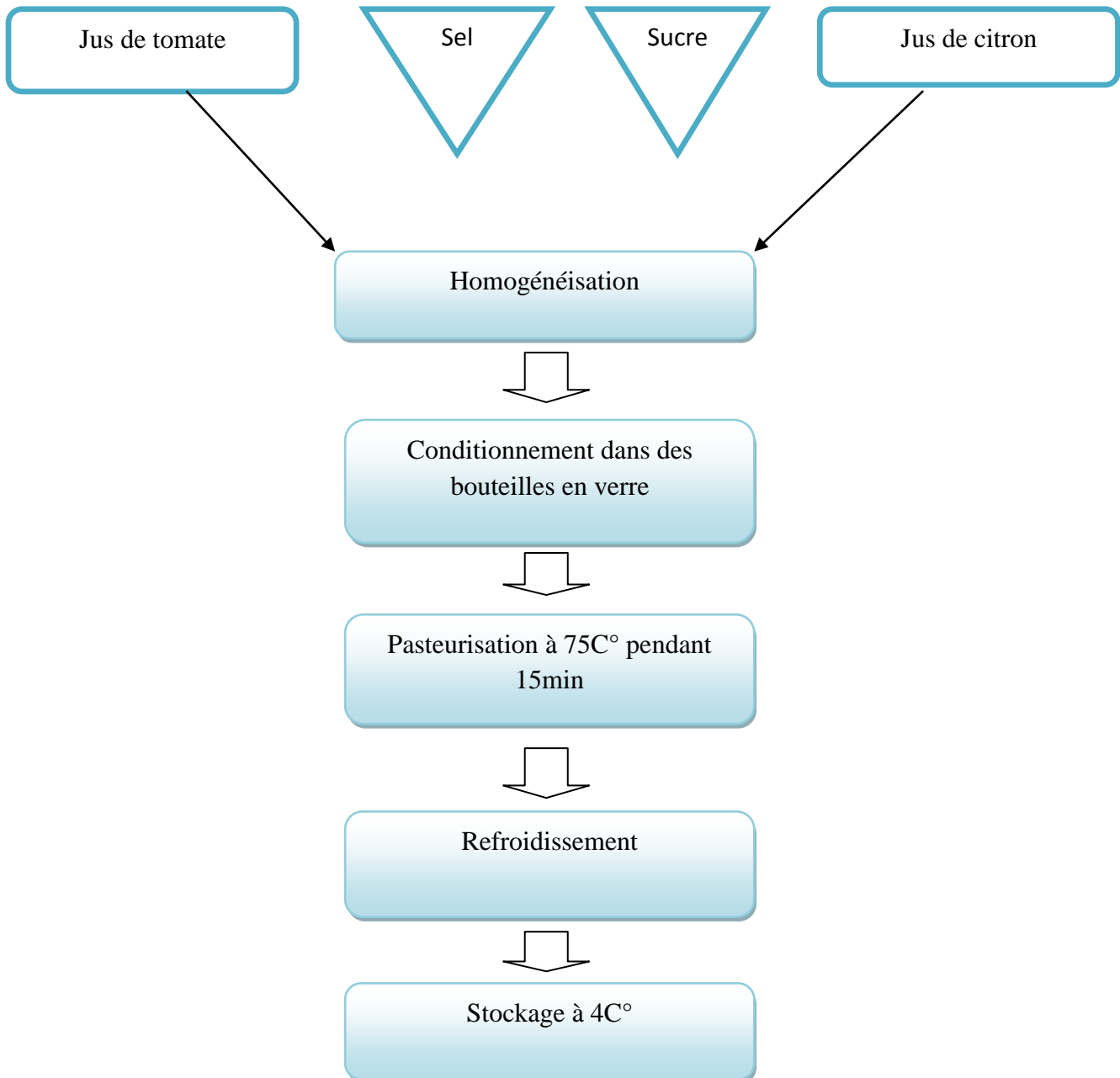


Figure 53 : diagramme de formulation de jus.

Chapitre V

Matériels et méthodes

IV- Choix d'un plan d'expériences

Comme le but de cette étude est d'optimiser une recette d'un jus de tomate, le choix s'est porté sur un plan D-optimal, le plan retenu nous permettra en premier lieu d'évaluer l'influence des facteurs sur les réponses choisies et au final aboutir à la détermination des valeurs optimales de ces facteurs.

Choix des facteurs et des réponses

Afin d'avoir une démarche scientifique et organisée, un plan d'expérience fut réalisé à l'aide d'un logiciel d'optimisation le MODDE 6. L'étape la plus essentielle dans ce cas est le choix des facteurs et des réponses du plan d'expérience ainsi que le choix des domaines d'études.

Les facteurs que l'on a jugé les plus pertinents sont :

- Facteur 01 : la concentration en jus de tomate (97%-100%).
- Facteur 02 : la concentration en jus de citron (0% - 3%).

Afin de minimiser le nombre d'essais d'autres ingrédients ont été fixés :

- ✓ Le sel = 0.2/ 100ml de la boisson formulée.
- ✓ Le sucre = 6 g/100 ml de la boisson formulée.

Suite aux études réalisées sur les paramètres physico-chimiques étudiés ; deux réponses ont été retenues :

- Réponse 01 : le degré brix (B°).
- Réponse 02 : l'acidité titrable (%).

Plan d'expérience retenu

Après avoir introduit les facteurs et les réponses cités en amont et choisit le modèle D-optimal, le logiciel a proposé la matrice suivante ;

Tableaux 14 : matrice d'essai proposée par le MODDE6.

Numéro d'essai	Concentration jus de tomate (%)	Concentration jus de citron (%)	Teneur en sel g/100ml	Teneur en sucre g/100ml	Taux de brix (° ou %)	Acidité (%)
1	97	0	0.2	6		
2	100	0	0.2	6		
3	97	3	0.2	6		
4	100	3	0.2	6		
5	97	1.5	0.2	6		

Chapitre V

Matériels et méthodes

6	100	1.5	0.2	6
7	98.5	0	0.2	6
8	98.5	3	0.2	6
9	98.5	1.5	0.2	6
10	98.5	1.5	0.2	6
11	98.5	1.5	0.2	6

Cette matrice d'expérience propose 15 essais, dont le point du centre du domaine d'étude est répété trois fois.

V- *Caractérisation physicochimique des boissons formulées*

Ces analyses ont porté sur la détermination du : pH, le degré Brix, la viscosité, acidité titrable, pour les boissons formulées, et la teneur en acide ascorbique (dosage de la vitamine C), dosage des poly phénols totaux, l'évaluation de l'activité antioxydante pour la boisson optimale donnée par le plan d'expériences utilisé.

1- Détermination du potentiel d'hydrogène

Principe

Le potentiel hydrogène est une expression globale de l'acidité d'un produit (**JORA, 1998**). C'est une mesure de la concentration des ions (H⁺) dans un jus de tomate. La concentration des ions hydrogènes détermine le caractère acide, neutre ou alcalin (basique) du jus de tomate. Le pH se mesure sur une échelle logarithmique variant de 1 à 14. Ainsi, la solution est neutre lorsque le pH est égale à 7, acide lorsque le pH est inférieure à 7, et alcaline (basique) lorsque le pH est supérieure à 7.

La **figure 54** ; représente l'équipement nécessaire pour la mesure du pH des boissons formulées.

Mode opératoire

- Prélever 5g d'échantillon de jus de tomate.
- Rincer l'électrode de mesure.
- Introduire l'électrode de pH mètre dans le bécher.
- Lire la mesure affichée.



Figure 54 : mesure de pH d'un jus de tomate et d'un jus de citron pur.

2- Détermination du degré Brix : (AFNOR, 1986)

+ Principe

Le Brix exprime le pourcentage de la concentration des solides solubles contenus dans un échantillon (solution aqueuse). Le contenu des solides solubles représente le totale de tout les solides dissous dans l'eau, incluant les sucres, les sels, les protéines, les acides etc. On entend par résidu sec soluble (déterminé par un réfractomètre) la concentration en saccharose d'une solution aqueuse ayant le même indice de réfraction que le produit analysé, dans des conditions déterminées de préparation et de température. Cette concentration est exprimée en pourcentage en masse.

+ Mode opératoire

Placer une goutte de liquide sur la surface du prisme. Abattre le deuxième prisme sur le premier, ce qui permet d'obtenir une couche uniforme de liquide. En dirigeant le réfractomètre vers une source lumineuse, deux zones apparaissent : une claire et l'autre sombre. La limite entre deux zones indique la grandeur de la réfraction. La valeur Brix est la valeur lue par le réfractomètre qui nous donne le pourcentage des sucres dans le produit.

La **Figure 55** représente le réfractomètre utilisé pour effectuer l'analyse.

+ Expression des résultats

1 degré Brix= 1g de sucre dans 100g de Solution

1brix°= 1% de matière sèche soluble

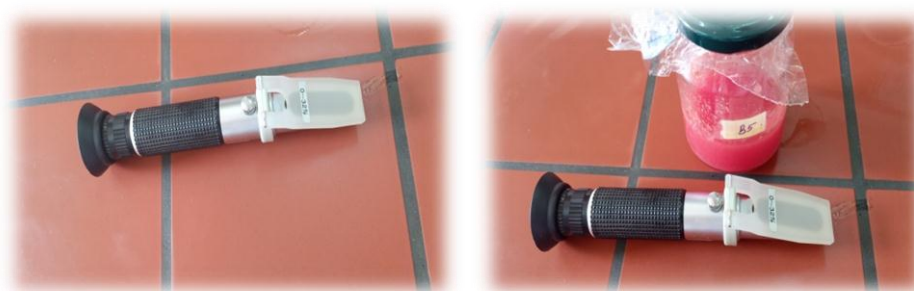


Figure 55 : un réfractomètre.

3- Détermination de l'acidité titrable (%)

✚ Principe

Selon BOARD (1998), il s'agit de qualifier la teneur totale en acides organiques naturels. Le dosage étant effectué par titration avec une base forte (NaOH, 0.1N) jusqu'au virage avec un inducteur coloré (phénolphtaléine).

✚ Préparation des solutions

La solution phénolphtaléine est préparée à partir de 1g phénolphtaléines (poudre) dans 50 ml de l'eau distillée et 50ml d'éthanol.

Pour la solution de NaOH 0.1N, nous avons mis 0.8g de NaOH dans 200ml de l'eau distillé.

✚ Mode opératoire

- Peser 25g d'échantillon ;
- Placer l'échantillon dans une fiole conique, ajouter ensuite 50ml de l'eau distillée préalablement bouillie ;
- Refroidir et bien mélanger ;
- Chauffer le contenant dans un bain marie pendant 30 min, refroidir puis transvaser le contenant dans une fiole conique graduée à 250ml ;
- Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée récemment bouillie.
- Refroidir et filtrer le contenant.
- Prélever à l'aide d'une pipette 25ml du filtrat, le verser dans un bécher, puis ajouter deux à trois gouttes de la solution phénolphtaléine tout en agitant ;
- La titration est faite au moyen d'une burette contenant la solution de NaOH à 0.1N jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante ;
- Noter le volume de NaOH versé.

La **figure 56** ; représente les différentes étapes de l'analyse.

Chapitre V

Matériels et méthodes

Remarque

- l'eau permet d'extraire les acides contenus dans la tomate.
 - L'eau doit être légèrement bouillie pour éliminer le dioxyde de carbone dissous qui pourrait fausser les résultats.
- ✚ Expression des résultats :

$$\text{Acidité titrable (\%)} = V(\text{NaOH}) / V(\text{filtrat} = 25\text{ml}) * 100 * C$$

$$C = 0.07 ; \text{coefficient de l'acide citrique.}$$



Figure 56 : préparation des filtrats et réalisation de titrage.

4- Détermination de la viscosité

✚ Principe

La viscosité est un paramètre de qualité important pour les produits dérivés de tomates, la connaissance de cette propriété rhéologique des nourritures liquides et semi solides est particulièrement importante pour régler les paramètres d'écoulement pendant la production.

Les données rhéologiques fiables et précises sont nécessaires pour installer et optimiser différentes opérations (pesé, mélange, chauffage, etc.) et pour assurer l'acceptabilité du produit (Koocheki, A et al, 2009).

Pour réaliser ces tests de viscosité, le rhéomètre de couette cylindrique de marque HAAKE a été utilisé en travaillant avec température constante $T = 20 \text{ C}^\circ$ et un taux de cisaillement $\gamma = 58.44 \text{ s}^{-1}$.

✚ Mode opératoire

- ✓ Prélever 50ml de jus à l'aide d'une éprouvette.
- ✓ Introduire l'échantillon dans le grand cylindre de viscosimètre.

Chapitre V

Matériels et méthodes

- ✓ Placer le petit cylindre à l'intérieure de grand cylindre.
- ✓ Placer les deux cylindres dans le rhéomètre.
- ✓ Lire la valeur de la viscosité affichée par le rhéomètre.

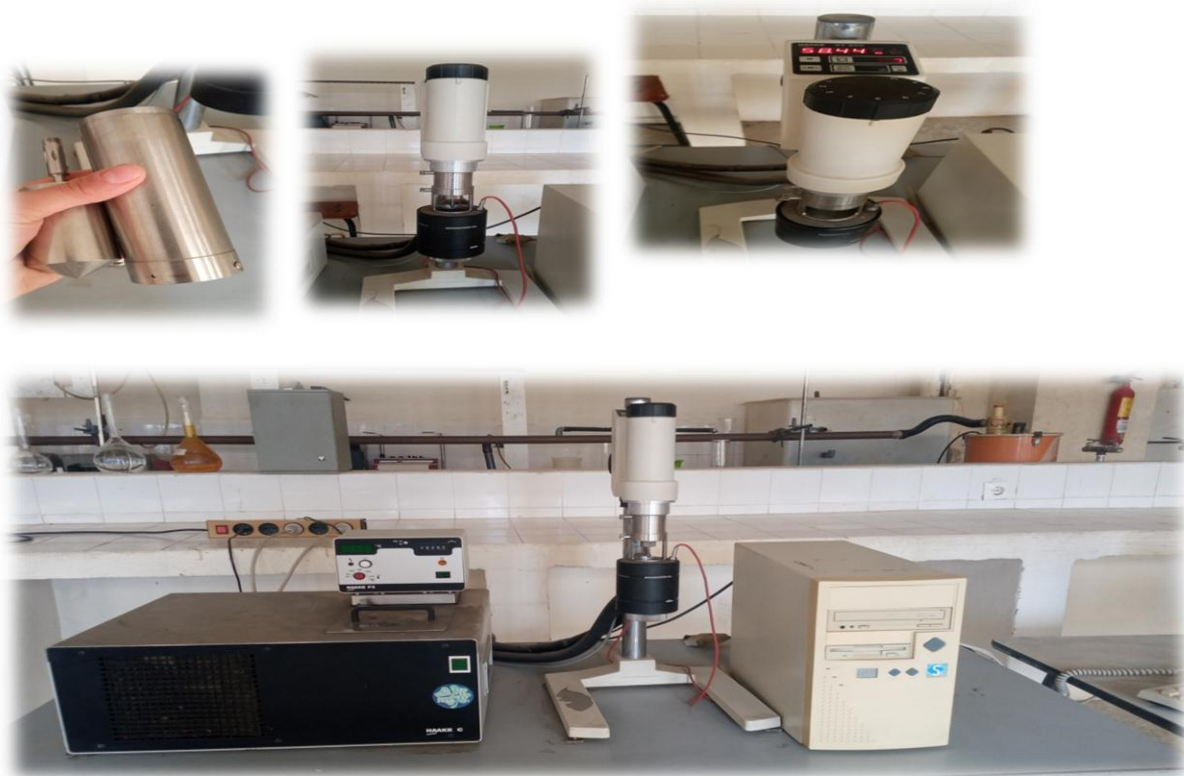


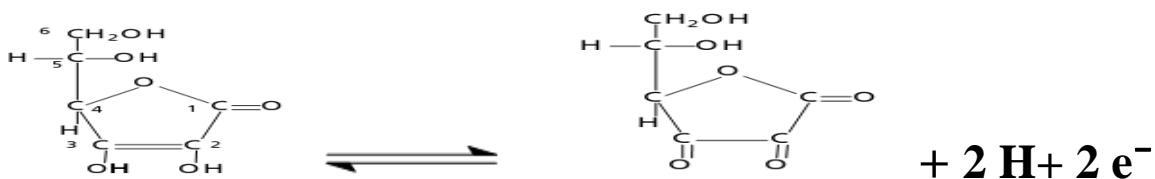
Figure 57 : rhéomètre de couette.

VI- Caractérisation physicochimique de la boisson optimale :

1- Dosage de la vitamine C

✚ Principe :

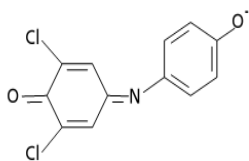
Le réactif Dichlorophenol Indo phénol (DCPIP) de couleur bleu, devient rose en milieu acide, se réduit en présence de l'acide ascorbique pour donner un composé incolore *figure 58*. La diminution de la couleur de la solution de DCPIP est détectée à la longueur d'onde de 515 nm.



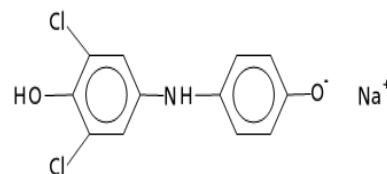
Chapitre V

Matériels et méthodes

Acide L-ascorbique



Acide déhydro L- ascorbique



2,6-dichloro-phénolindophénol

Leuco dérivé (*Incolore*)

Figure 58 : principe de dosage.

Mode opératoire

➤ Préparation de la gamme d'étalonnage

- ✓ Peser 0.25 mg d'acide ascorbique;
- ✓ Les dissoudre dans 10 ml d'acide oxalique, soit une solution (SM) avec une concentration de 0.025 mg/ml ;
- ✓ Diluer la solution mère.

Le **tableau 15** représente la préparation des dilutions de l'acide ascorbique pour la réalisation de la courbe standard de la vitamine C.

Tableau 15 Préparation des dilutions de l'acide ascorbique pour la réalisation de la courbe standard de la vitamine C.

Dilution	0	1/5	3/5	5/5 (SM)
Concentration	0	0.008	0.016	0.025

➤ Traçage de la courbe d'étalonnage d'acide ascorbique :

- ✓ Prélever à l'aide d'une pipette graduée 1 ml de chaque dilution préparée puis, verser le volume dans une cuve, ajouter ensuite 1 ml de réactif DCPIP à chaque cuve.
- ✓ Introduire chacune des cuves dans le spectrophotomètre qui va nous donner l'absorbance à 515 nm de chaque dilution.
- ✓ Le blanc est représenté par 9 ml d'acide oxalique.

➤ Préparation de la solution :

- Prélever 1 ml du jus à l'aide d'une éprouvette graduée puis verser le volume dans un bécher ensuite ajouter 9ml d'acide oxalique à l'aide d'une pipettes graduée ;

Chapitre V

Matériels et méthodes

- Agiter le mélange pendant 5 minutes à l'aide d'un agitateur puis filtrer ce dernier à l'aide d'un tube à essais équipé d'un entonnoir et un papier filtre ;



Figure 59: préparation de la solution.

➤ Dosage

- Prélever à l'aide d'une pipette graduée 1 ml de la solution préparée puis, verser le volume dans une cuve, ajouter ensuite 1 ml de réactif DCPIP.
- Introduire la cuve dans le spectrophotomètre qui va nous donner l'absorbance.



Figure 60 : Dosage de la solution par le DCPIP et mesure de l'absorbance.

La teneur en vitamine C contenant dans l'échantillon est déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage obtenue en utilisant l'acide ascorbique.

2- Dosage des poly phénols totaux

✚ Principe

Le dosage des phénols totaux est basé sur l'oxydation des composés phénoliques et de développement d'une coloration. La méthode la plus utilisée est celle de Folin-Ciocalteu, (M'hiri N, 2015).

Ce réactif est constitué par un mélange d'acide phosphotungstique (H₃PW₁₂O₄₀) et d'acide phosphomolybdique (H₃PMO₁₂O₄₀) (Hama F et autre, 2017). Sous l'action des antioxydants, ces acides vont être transformés en oxydes de tungstène et de molybdène de

Chapitre V

Matériels et méthodes

coloration bleue. L'absorption sera mesurée à 760 nm contre une gamme étalon mesurée avec l'acide gallique. Ceci permet de quantifier la présence de phénols totaux dans l'extrait, exprimé en mg d'équivalent acide gallique (Thomas D, 2016).

✚ Mode opératoire

Le dosage des poly phénols totaux est réalisé par la méthode décrite dans la littérature (Singoleton V et autres, 1999, Kamazawa S et autres, 2002). Avec quelques modifications.

➤ Préparation de la gamme d'étalonnage

- ✓ Peser 3.5 mg d'acide gallique;
- ✓ Les dissoudre dans 25ml d'eau distillée, soit une solution (SM) avec une concentration de 0.14 mg/ml ;
- ✓ Diluer la solution mère.

Le **tableau 16** représente la préparation des dilutions de l'acide gallique pour la réalisation de la courbe standard des poly phénols totaux.

Tableau 16 Préparation des dilutions de l'acide gallique pour la réalisation de la courbe standard des poly phénols totaux.

Dilution	0	1/4	2/3	3/2	4/1
Concentration mg/ml	0	0.028	0.056	0.084	0.1

➤ Traçage de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique

- ✓ Prélever 0,2 ml de chaque dilution d'échantillon dans des tubes à essais ;
- ✓ Ajouter 1 ml de réactif de Folin-Ciocalteu ;
- ✓ Après 3 mn, ajouter 0,8ml de carbonate de sodium à 7.5 % ;
- ✓ Laisser incuber pendant une heure à température ambiante et à l'abri de la lumière.

Le blanc est représenté par 1ml de Folin-Ciocalteu et 0,8ml de carbonate de sodium à 7.5 %.

La lecture des absorbances est faite à 765 nm, après agitation et repos d'une heure. La Concentration en composés phénoliques totaux est déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage obtenue en utilisant l'acide gallique comme standard d'étalonnage.

➤ Dosage des poly phénols totaux dans l'extrait éthanolique :

- ✓ On prend 1ml de jus pur on ajoute 9ml de l'eau distillée

Chapitre V

Matériels et méthodes

- ✓ 0.2 ml de jus dilué à 1/10 auquel on ajoute 1 ml de Folin Ciocalteu (dilué 10 fois).
- ✓ Après 10 min on ajoute 0.8 ml de solution de Carbonate de sodium 7.5%.
- ✓ Incubation 30 min à l'air ambiant.
- ✓ Lire la densité optique à 765nm.

La concentration en composés phénoliques est déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage obtenue en utilisant l'acide gallique.



Figure 61: préparation et dosage de l'extrait de jus de tomate.

3- Test d'activité anti oxydante

✚ Principe

Le DPPH (ou 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) est un radical stable à température ambiante et de couleur bleu. Il est l'un des premiers radicaux à avoir été utilisé pour étudier la relation structure/activité antioxydante des composés phénoliques (**Brand-williams et autres, 1995**). Le maximum de son absorbance se situe à 517nm dans le méthanol et l'éthanol. (**Bouguerra Ali, 2012**). Le DPPH possède dans sa structure un électron non apparié sur un atome du pont azote-azote. L'efficacité d'un antioxydant peut être mesurée par sa capacité à réduire le radical. Ceci s'observait historiquement par le changement de couleur allant du bleu violet (forme oxydée) au jaune (forme réduite) comme il est indiqué sur la **figure 61**.

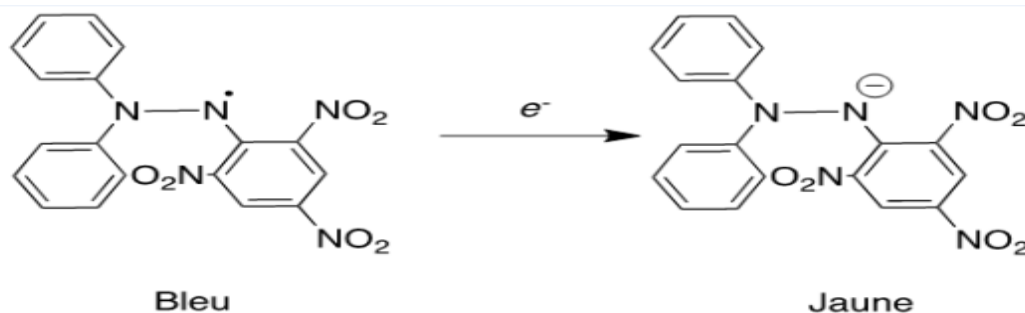


Figure 62 : modification du DPPH• lors de transfert électronique (**Thomas D, 2016**).

Chapitre V

Matériels et méthodes

✚ Mode opératoire

Pour l'étude de l'activité anti-radicalaire de nos échantillons (jus pur, la dilution 1/100 de l'extrait de l'écorce) nous avons suivi la méthode de **Santos *et al.* (2010)**. Après avoir solubilisé 31.54 mg de DPPH dans 100 ml d'éthanol absolu, trois tubes ont été préparés séparément :

- ✓ Echantillon : 500 µl DPPH + 7.5 ml de chaque échantillon ;
- ✓ Contrôle négatif : 500 µl DPPH + 7.5 ml d'éthanol ;
- ✓ Contrôle blanc : 500 µl d'éthanol + 7.5 ml de chaque échantillon ;

Après agitation, les tubes ont été placés à l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes. La lecture a été effectuée par la mesure d'absorbance à 517 nm **figure 06**. L'intensité de la couleur observée est inversement proportionnelle au potentiel antioxydant des échantillons étudiés (**Sachez-Moreno, 2002**).



Figure 63 : évaluation de l'activité antioxydante de la boisson optimale.

✚ Expression des résultats

Le pourcentage de l'inhibition est donné selon la formule suivante :

$$\text{Activité anti radicalaire \%} = ((A0 - A1)/A0) \times 100.$$

A0 : Absorbance du control

A1 : Absorbance de l'échantillon (**Harris G, et autre, 2009**).

Chapitre V

Matériels et méthodes

VII- Caractérisation sensorielle des boissons formulées

La qualité organoleptique est un facteur d'acceptabilité des produits par le consommateur sans passer par les analyses physiques ou chimiques, elle est surtout appréciée par les organes de sens. La couleur, l'odeur et le goût sont des facteurs de l'appétence de l'aliment. L'appréciation ou la qualité organoleptique d'une boisson conservée présente un grand intérêt du fait qu'elle nous informe sur l'état du produit et le degré d'altération au cours de la conservation. La méthode utilisée est proche de celle décrite par **Sauvageot (1982)**. Certaines précautions s'avèrent nécessaires avant d'entamer le test de la qualité organoleptique.

Conditions de réalisation du test

La salle de dégustation doit avoir un accès facile, éloigné du bruit, un éclairage suffisant et une température convenable. Le nombre d'échantillons à dégustés ne doit pas dépasser 7 échantillon. De ce fait nous avons éliminé la première et la deuxième formule.

Quantité offerte

Servir aux sujets une quantité suffisante qui leur permettra de déguster autant de fois qu'ils le désirent avec la possibilité de se rincer la bouche avec de l'eau à chaque dégustation.

Jury

L'évaluation repose sur un jury auquel on demande de se prononcer sur les caractéristiques organoleptiques suivantes : le goût, la couleur, et l'odeur de produit. Les membres de jury ne doivent pas fumer avant et pendant la dégustation, ils ne doivent surtout pas avoir faim, ni soif, ni être malade, ni consommer des aliments à parfum fort (café).

Principe du test

Le test que nous avons effectué est basé sur un certain nombre de remarques notées sur une fiche dégustation (**ANNEX II**) proposée au jury composé de dix experts, il s'agit de présenter aux dégustateurs les boissons formulées. Chaque échantillon des différents essais est présenté dans des gobelets en verre numérotés (**figure 63**), puis on demande à chaque membre de jury d'effectuer une appréciation organoleptique portant sur la dégustation, l'olfaction, ainsi que l'identification visuelle.

Chapitre V

Matériels et méthodes



Figure 64: Préparations nécessaires pour la dégustation.

La méthode de notation utilisée est la suivante :

- 1- Extrêmement désagréable
- 2- Très désagréable
- 3- Moyennement désagréable
- 4- Assez désagréable
- 5- Ni agréable ni désagréable
- 6- Désagréable
- 7- Agréable
- 8- Très agréable
- 9- Extrêmement agréable

Les résultats par la suite sont présentés sous forme des histogrammes en pourcentage.

Chapitre VI



Résultats et discussions

Chapitre VI

Résultats et discussions

I- Introduction

Notre partie expérimentale est articulée au tour de cinq axes, la pré-formulation par un plan D-optimale, qui est une étape incontournable lorsqu'on se lance dans le développement d'une nouvelle formulation, qui nous permettra de récolter un maximum d'information concernant le produit à formuler, et en deuxième lieu la caractérisation physicochimique des formules données par le plan utilisé, et en troisième lieu l'obtention de l'optimum à l'aide d'un logiciel qui utilise des outils mathématiques et statistiques d'optimisation, puis la caractérisation physicochimique de ce dernier. Finalement, une caractérisation sensorielle des boissons formulées (à l'exception de la première et la deuxième formule).

II- pré-formulation

Lors de cette étape nous avons choisi un plan D-optimale pour la formulation, réalisé par le MODDE6, après avoir insérés les intervalles des pourcentages possibles du jus de tomate et du jus de citron, nous avons obtenu 9 formules comme le montre l'historgramme suivant :

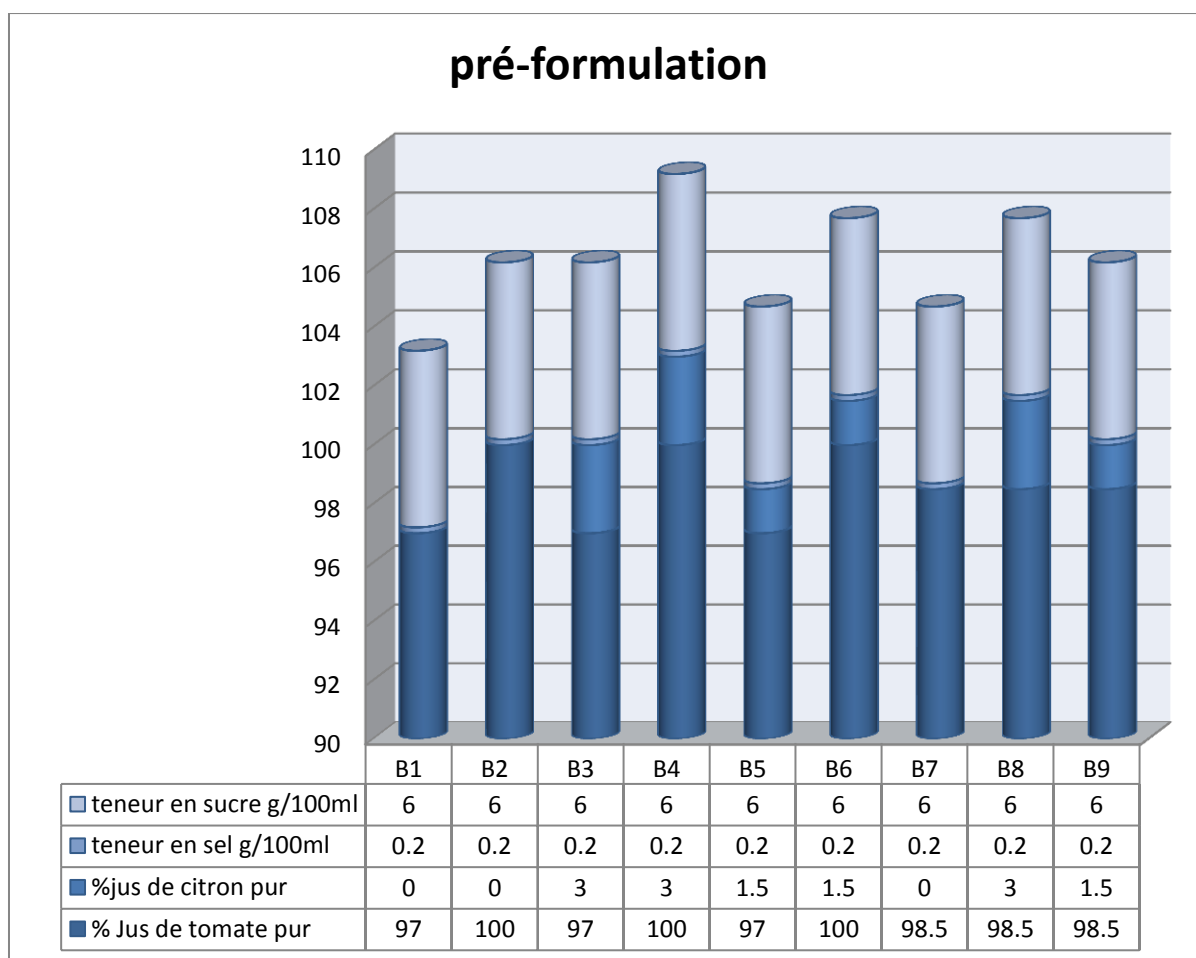


Figure 65: formules données par le MODDE 6.

Résultats et discussions

III- Caractérisation physicochimique des boissons formulées

Les paramètres mesurés lors des analyses physico-chimiques des produits finis sont : l'extrait sec soluble (Brix), le pH, l'acidité titrable et la viscosité.

1- Analyses physicochimiques de la matière première

Les résultats d'analyses physicochimiques sont représentés par les histogrammes de la figure 66 et 67.

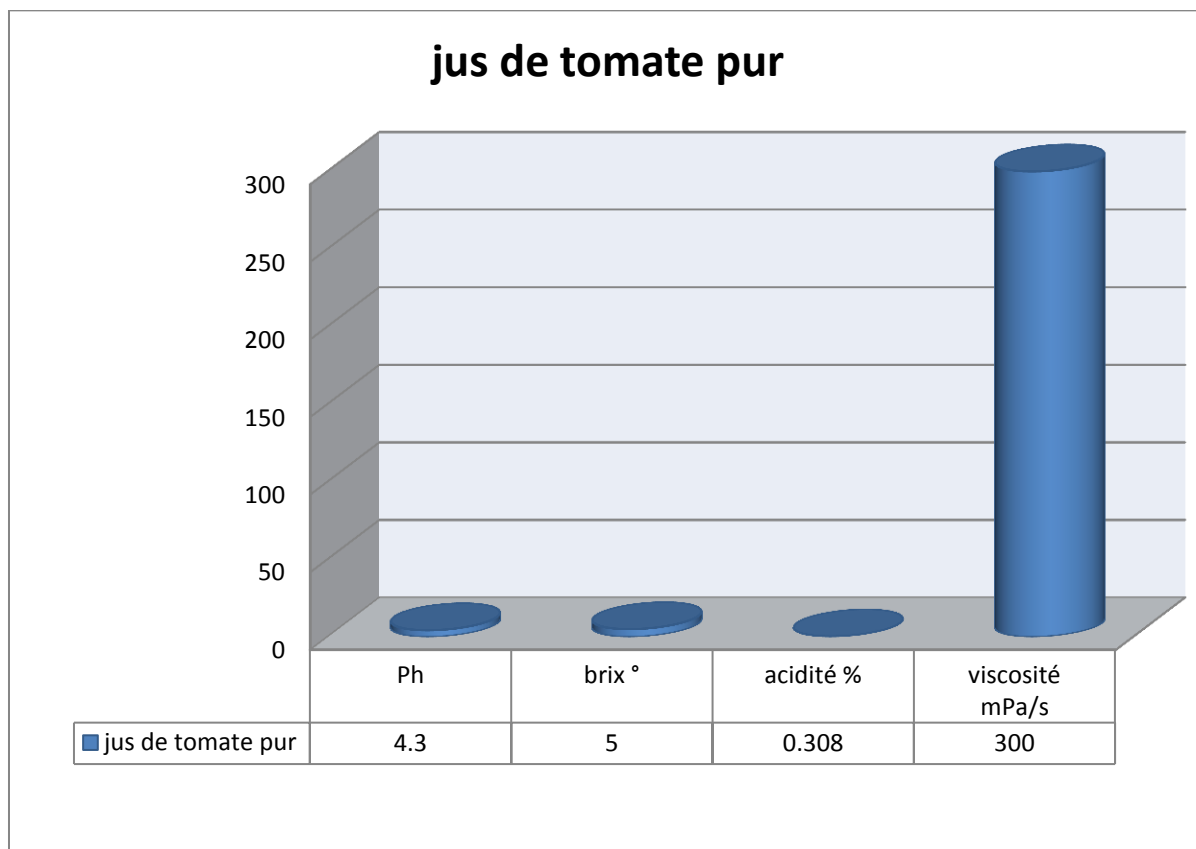


Figure 66: résultats d'analyses physicochimiques du jus de tomate pur.

D'après les résultats physicochimiques obtenus, le jus de tomate pur est caractérisé par un degré brix de 5°, un pH de 4.3, une acidité de 0.308% en acide citrique et une viscosité de 200 mPa/s.

Selon une évaluation physicochimique de quelques variétés de tomate par (Dossou. J et al, 2007), les valeurs du pH varie entre 4 et 4.5, et la valeur de brix varie entre 4.5° et 5°, et en ce qui concerne l'acidité en % d'acide citrique, les valeurs se situent dans l'intervalle 0.23% - 0.36%. Alors, les valeurs obtenues pourraient être considérées comme satisfaisantes, car elles sont proches de la majorité des valeurs rapportées par (Dossou. J et al, 2007).

Résultats et discussions

La viscosité est un paramètre important de la qualité de la pluparts des produits finis. C'est une grandeur physique qui exprime la capacité d'un corps à s'opposer au cisaillement (Ayouaz et Benmamas, 2017), peut être aussi définit comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière.

La viscosité est un facteur technologique important qui est en relation avec la teneur en substances insolubles dans l'alcool : Protéines, Pectines, Polysaccharides., Elle est l'effet combiné des liquides, matière soluble, insoluble en suspension qui contribue à la consistance générale de la pâte de tomate (Gallais, 1992). Le résultat de la viscosité obtenue montre que le jus de tomate pur un fluide consistant et riche en substance insolubles (les pectines).

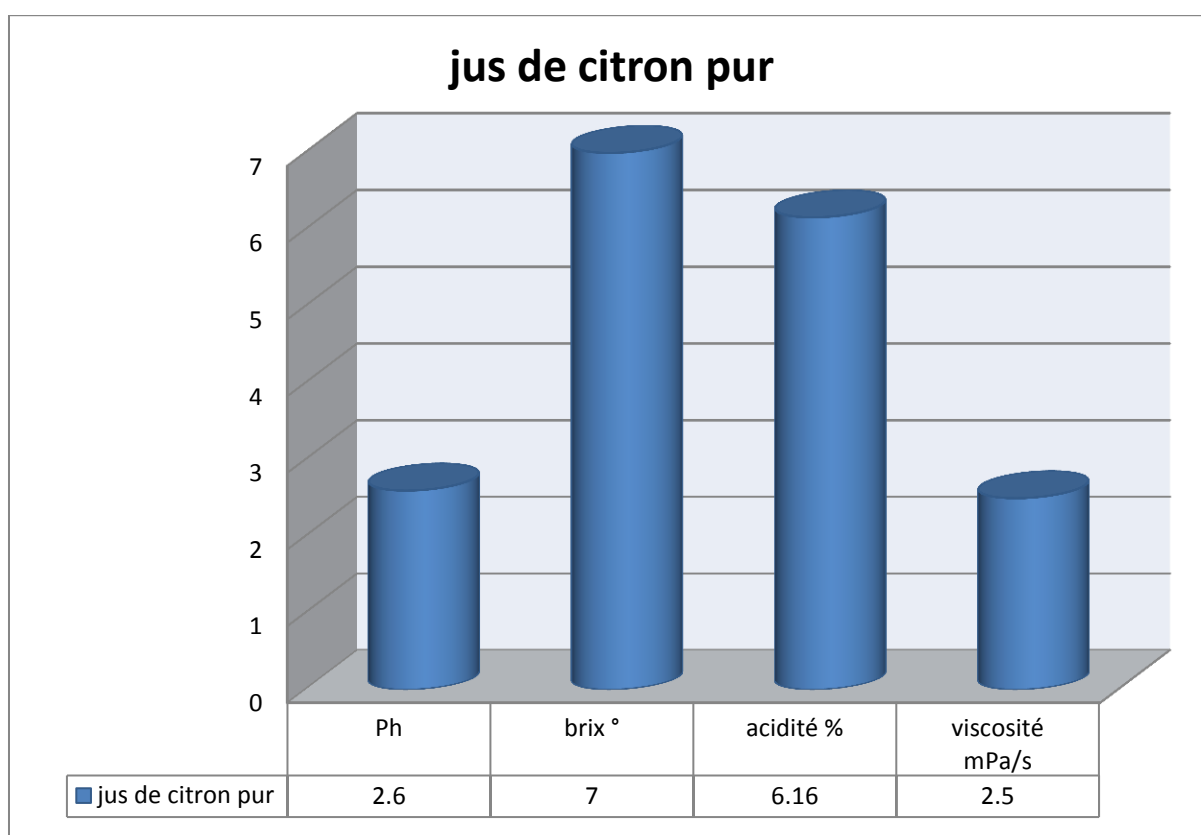


Figure 67 : résultats d'analyses physicochimiques du jus de citron.

En dernier le jus de citron pur est caractérisé par un degré brix de 7°, un pH de 2.6, une acidité en % d'acide citrique de 0.44 et une viscosité de 2.5 mPa/s.

Selon (Espirad 2002), les valeurs de brix d'un jus de citron pur sont comprises entre 7 et 12, et le pH de ce dernier varie entre 2 et 3.2. Alors, les valeurs du brix et du pH obtenues sont conformes aux résultats de (Espirad 2002).

D'un point de vue génétique, les agrumes peuvent être divisés en deux groupes : celui des acides (citrons et limes) et celui des intermédiaires (oranges, mandarines, pomelos...)

Chapitre VI

Résultats et discussions

(Ollitrault et al, 2003). En effet, l'acidité titrable des citrons et des limes est la plus forte (respectivement 6.2 et 6.3%) comparée à celle des oranges (2.1%), des pomelos (1.3%) et des mandarines (1.1%) (Antoine. S, 2013). Alors, la valeur de 6.16% d'acidité peut être considérée comme une valeur satisfaisante car elle est proche de la valeur donnée par (Antoine. S, 2013).

En générale, les fluides avec des structures de molécules plus grandes et plus complexes, auront des viscosités plus élevées c'est le cas de notre jus de tomate pur. Selon quelques valeurs de viscosité de fluides courants à température ambiante comme l'eau et le lait (1 mPa/s et 2 mPa/s respectivement) figurées sur la fiche conseils de **DOSAPRO MILTON ROY**, on remarque que la valeur de viscosité obtenue pour le jus de citron pur est proche des valeurs de fluides précédents.

2- Analyses physicochimique des produits finis

a- pH

La **figure 68** illustre les résultats de pH des boissons formulées.

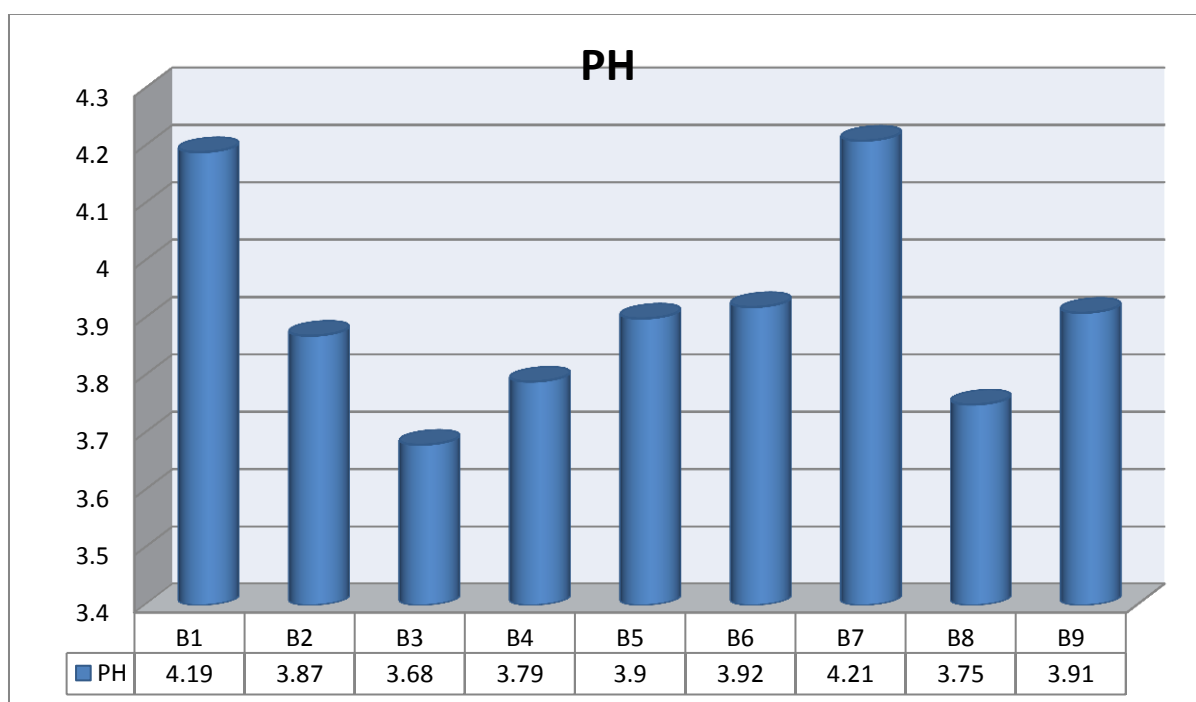


Figure 68 : Résultats de pH des boissons formulées.

Le potentiel d'hydrogène est l'une des variables utilisées pour caractériser les propriétés des milieux. Relativement facile à mesurer, le pH est utilisé dans de nombreux domaines

Résultats et discussions

comme variable opératoire, caractérisant du produit fini ou encore à des fins de contrôle de qualité. (Boukhiar, 2009),

Le pH relativement faible des purées de tomate ($\text{pH} < 4,2$) est un avantage du point de vue de la stabilité. En effet, ce niveau de pH réduit considérablement le taux et la gamme de microorganismes pouvant se développer sur le produit. Seuls les micro-organismes acidophiles, notamment les levures, les moisissures, les acétobacters et lactobacillus peuvent s'y développer; mais pas de coliformes de type *Escherichia coli* (Dossou. J et al, 2007).

La mesure du pH est l'un des paramètres les plus importants dans le contrôle de la qualité de toute denrée alimentaire. En outre le pH est important lors de l'utilisation des régulateurs d'acidité (acide citrique) en tant qu'agents de conservation. (Amiot J et autres, 2002).

D'après les résultats illustrés dans l'histogramme de la **figure 68** on remarque que, les valeurs du pH varient entre 3 et 4 ce qui est indispensable pour la conservation des boissons formulées. Aussi, les boissons présentent une différence hautement significative des valeurs du pH, cette variation due aux différentes concentrations en jus de citron pur ajoutées aux boissons formulées.

En effet, les boissons B1, B2 et B7 qui ne contiennent pas du jus de citron présentent des valeurs du pH de l'ordre 4 proche à celle de jus tomate pur. Les valeurs du pH présentées par les boissons B5, B6 et B9 sont de l'ordre 3.9, 3.92, 3.91 respectivement, elles sont supérieures à celle présentées par les boissons B3, B4 et B8 (3.68, 3.79 et 3.75 respectivement) car ces dernières possèdent une concentration plus élevée du jus de citron pur (3%) par rapport aux autres boissons (1.5%).

b- Degré Brix (extrait sec soluble)

La **figure 69** illustre la teneur en extrait sec soluble des boissons formulées.

Résultats et discussions

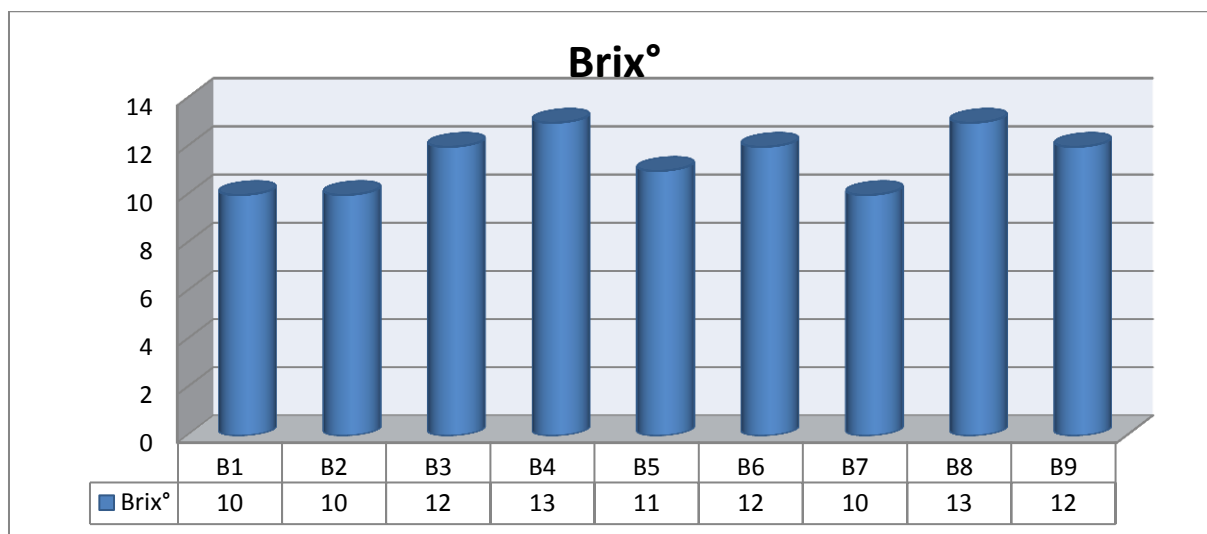


Figure 69 : Résultats de degré Brix des boissons formulées.

L'indice réfractométrique des jus permet d'évaluer rapidement leur concentration en sucres solubles. Il mesure en effet la fraction de matière sèche soluble majoritairement composée de ces sucres solubles (**Travers, 2004**).

Le Brix est le principal paramètre technologique dans les concentrés de tomate. Il représente le degré de concentration du jus de tomate (**Alioui, S, 2020**).

D'après les résultats illustrés dans l'histogramme de la **figure 69** on remarque que, les valeurs du degré brix des boissons formulées varient entre 10° et 13°, elles sont supérieures à la valeur obtenue pour un jus de tomate pur qui est de l'ordre 5°. Cette augmentation due à l'ajout d'une quantité constante du sucre qui est égales à 6g par 100ml de la boisson ainsi que des concentrations différentes en jus de citron. Aussi, on remarque une variation significative des valeurs du brix° présentées par les boissons formulées, cette variation est due aux différentes concentrations en jus de tomate pur et en jus de citron pur ajoutées lors de la formulation.

En effet, les boissons B1 et B2 et B7 donnent la valeur minimale du Brix° qui est égale à 10° car ces boissons contiennent seulement le jus de tomate à des proportions proches (97%, 98.5% et 100%). Les boissons B4 et B8 donnent la valeur maximale du brix° qui est égale à 13° car ces deux boissons possèdent une concentration élevée en jus de citron (3%) et des concentrations très proches en jus de tomate (100% et 98.5% respectivement). La boisson B3 représente une composition très proches de celle des boissons B4 et B8 (3% jus de citron ; 97% jus de tomate) et elle donne un Brix° de l'ordre de 12° proche à la valeur maximale. Les boissons B6 et B9 présentent une valeur moyenne du Brix° qui est égale à 12° car elles sont

Chapitre VI

Résultats et discussions

formulées par l'ajout d'une concentration moyenne en jus de citron (1.5%) et des concentrations proches en jus de tomate (100% et 98.5% respectivement). En fin, la boisson B5 donne une valeur 11° du Brix° qui est proche de la valeur moyenne car cette dernière possède une composition très proche de celle des boissons B6 et B9 (1.5% jus de citron ; 97% jus de tomate).

La diminution de °Brix des boissons peut être due soit à la fermentation partielle de sucre ajouté ou bien de sucre provenant des fruits. Cette hypothèse est confirmée par le travail effectué par (Echeverria et al, 1989).

c- Acidité titrable

La **figure 70** illustre le taux d'acidité des boissons formulées.

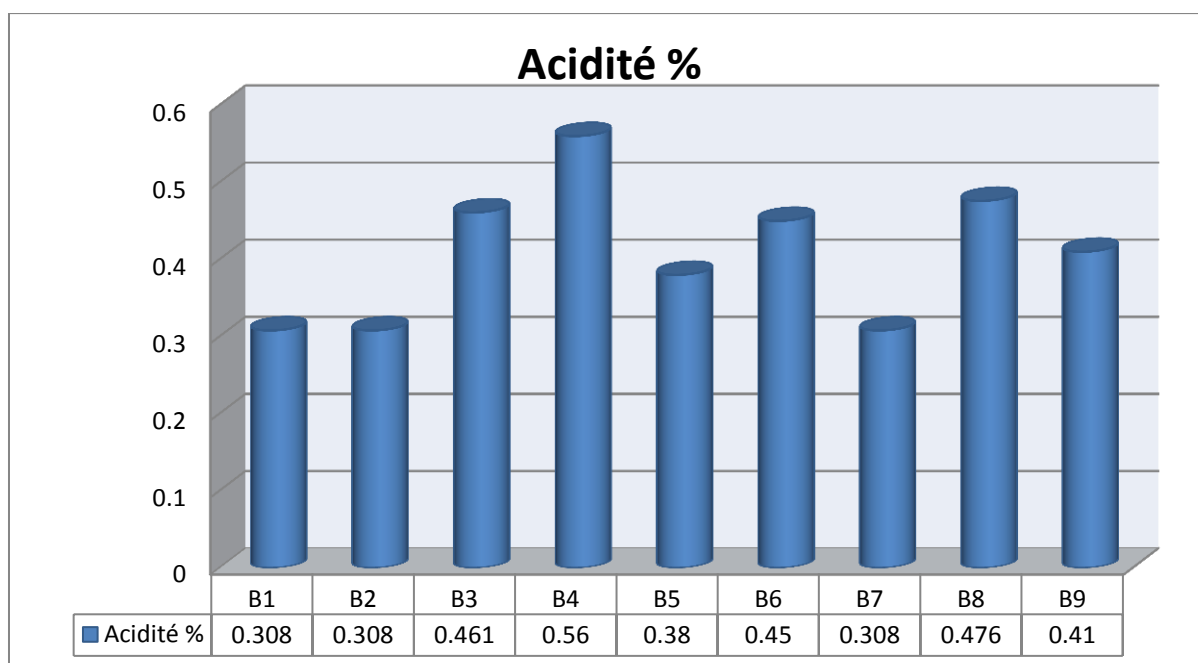


Figure 70: Résultats de l'acidité titrable des boissons formulées.

L'acidité est également un critère important de qualité des fruits et légumes. Le rapport des sucres et de l'acidité renseigne sur le caractère doux, équilibré et acidulé des produits (Sophie. A et al, 2016).

L'acide citrique représente 9% et l'acide malique 4% de la matière sèche de la tomate, ces acides sont responsables de l'acidité du fruit et jouent un rôle important dans la qualité gustative de la tomate. Ces acides jouent, aussi, un rôle de conservateur par l'abaissement du pH (Alavoine et al, 1988).

Chapitre VI

Résultats et discussions

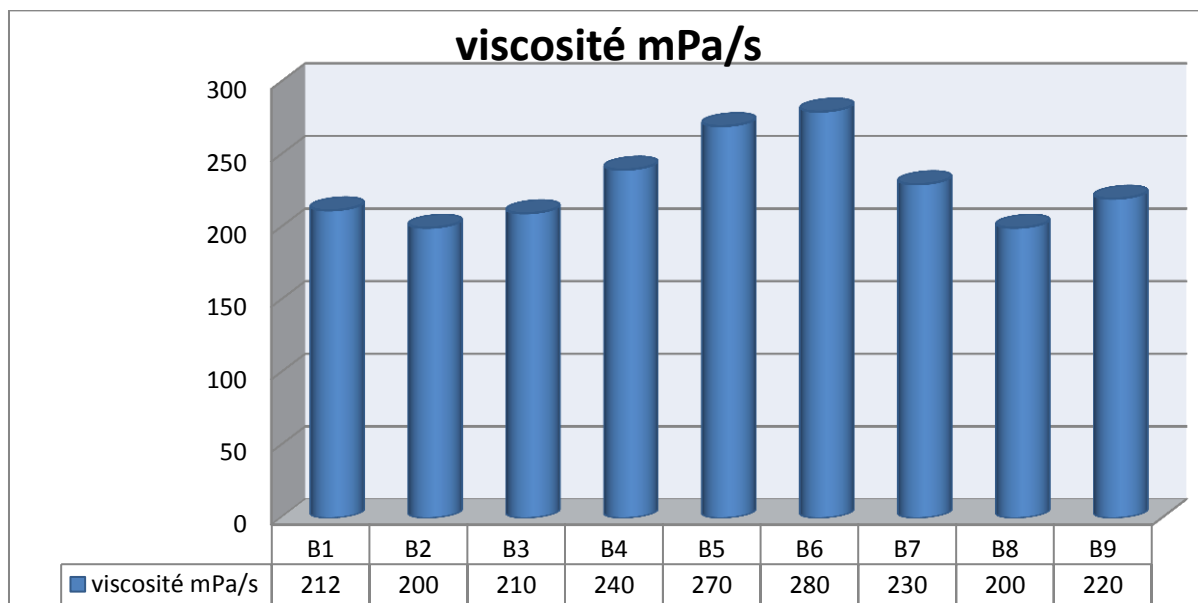
Selon **Verxhivker** et **Galkina** (1993), le taux de l'acidité titrable de la tomate est de l'ordre de 0.8 %. Celle destiné à la transformation est de 0.4% (**Fagbohoun** et **Kiki**, 1999).

D'après les résultats illustrés dans l'histogramme de la **figure 70** on remarque que, les valeurs d'acidité présentées par les boissons formulées se situent entre 0.308% et 0.56% , elles sont différentes de la valeur donnée par le jus de tomate pur, cette variation ou bien cette augmentation due à l'ajout des concentrations différentes en jus de citron, ce dernier est riche en acide citrique et donne une acidité de l'ordre 6.16% en acide citrique.

En effet, les boissons B1, B2 et B7 représentent la valeur minimale de l'acidité (0.308%) et elle est identique à celle de jus de tomate pur, car ces dernières ne contiennent que le jus de tomate à des proportions proches (97%, 100% et 98.5% respectivement). Les boissons B3, B4 et B8 donnent des valeurs plus élevées de l'acidité et proches l'une de l'autre ; elles sont d'ordre 0.461%, 0.56% et 0.476% respectivement, car ces boissons se composent des concentrations très proches en jus de tomate (97%, 100% et 98.5%) et une concentration identique et élevée en jus de citron qui est de l'ordre 3%. Enfin, les boissons B5, B6 et B9 donnent des valeurs moyennes et proches l'une de l'autre en acidité par rapport aux autres boissons, elles sont de l'ordre (0.38%, 0.45% et 0.41%), cette variation est justifiée par le fait que, les concentrations en jus de citron utilisées pour la formulation sont identiques et égales à 1.5%, et les concentrations en jus de tomate utilisées sont proches et égales à 97%, 100% et 98.5% respectivement.

d- viscosité

La **figure 71** illustre la viscosité des boissons formulées.



Résultats et discussions

Figure 71 : résultats de la viscosité des boissons formulées.

La raison fréquente justifiant des mesures de propriétés rhéologiques peut être trouvée dans le contrôle de qualité des produits liquides qui se doivent d'être uniformes et cohérents d'un lot à un autre. Pour cela, la mesure de la viscosité s'avère être une mesure indirecte du niveau d'homogénéité et de la qualité du produit (**Addil, 1993**), car elle conditionne l'écoulement des fluides dans la canalisation et le long des parois. Elle permet de mesurer directement ou indirectement certaines caractéristiques des produits (texture...etc), Elle conditionne le bon fonctionnement des processus (**Harchelle, 1997**).

D'après les résultats illustrés dans l'histogramme de la **figure 71** on remarque que, les valeurs de la viscosité présentées par les boissons formulées se situent entre 200 mPa/s et 280 mPa/s, elles sont inférieures à la valeur donnée par le jus de tomate pur qui est égale à 300 mPa/s.

Dans le cas du concentré de tomate, une augmentation de la solubilisation des pectines coïncide avec la diminution de la viscosité du sérum (**Den Ouden & Van Vliet, 1997; Diaz et al, 2009; Goodman et al, 2002**). Ainsi **Diaz et al (2009)** ont suivi les modifications du sérum lors de plusieurs étapes de fabrication du concentré de tomate. Ils ont observé que suite au traitement thermique la viscosité du sérum diminuait de 35% par rapport au jus initial de tomate. **Hsu (2008)** a comparé les jus de tomate obtenus par Hot Break (92°C, 2min) et Cold Break (60°C, 2 min) et il a observé que la viscosité du jus diminue avec le traitement type Cold Break, mais qu'elle augmentait avec le Hot Break. La différence entre les viscosités obtenues avec les deux traitements a été attribuée à l'activité enzymatique et la solubilisation des pectines que celle-ci entraîne (**Espinosa Brisset, 2012**).

D'après la faible variation de valeurs de viscosité obtenues lors de l'analyse des boissons B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8 et B9, on constate que les concentration en jus de tomate et en jus de citron n'ont aucun effet sur la viscosité des produits finis.

IV- Obtention d'un optimum

Après la pré-formulation des boissons par le MODDE 6 et la caractérisation physicochimique de celle-ci nous avons inséré les valeurs de degré brix et d'acidité comme réponses. Alors, le MODDE 6 nous a donné le tableau suivant :

Tableaux 17 : matrice d'étude complétée.

Chapitre VI

Résultats et discussions

Exp p No	Exp Nam e	Run Orde r	Incl/Ex cl	Concentrati on tomate	Concentrati on citron	Concentrati on l	Concentrati on sucre	Tau x de Brix	Acidité strongl e>
1	N1	1	Incl	97	0	0,2	6	10	0,308
2	N2	5	Incl	100	0	0,2	6	10	0,308
3	N3	10	Incl	97	3	0,2	6	12	0,461
4	N4	3	Incl	100	3	0,2	6	13	0,56
5	N5	8	Incl	97	1,5	0,2	6	11	0,38
6	N6	7	Incl	100	1,5	0,2	6	12	0,45
7	N7	11	Incl	98,5	0	0,2	6	10	0,308
8	N8	9	Incl	98,5	3	0,2	6	13	0,476
9	N9	4	Incl	98,5	1,5	0,2	6	12	0,41
10	N10	6	Incl	98,5	1,5	0,2	6	12	0,41
11	N11	2	Incl	98,5	1,5	0,2	6	12	0,41

1- Analyses globales des résultats

a- Analyse statistique

La **figure 72** représente un résumé des facteurs statistiques obtenus.

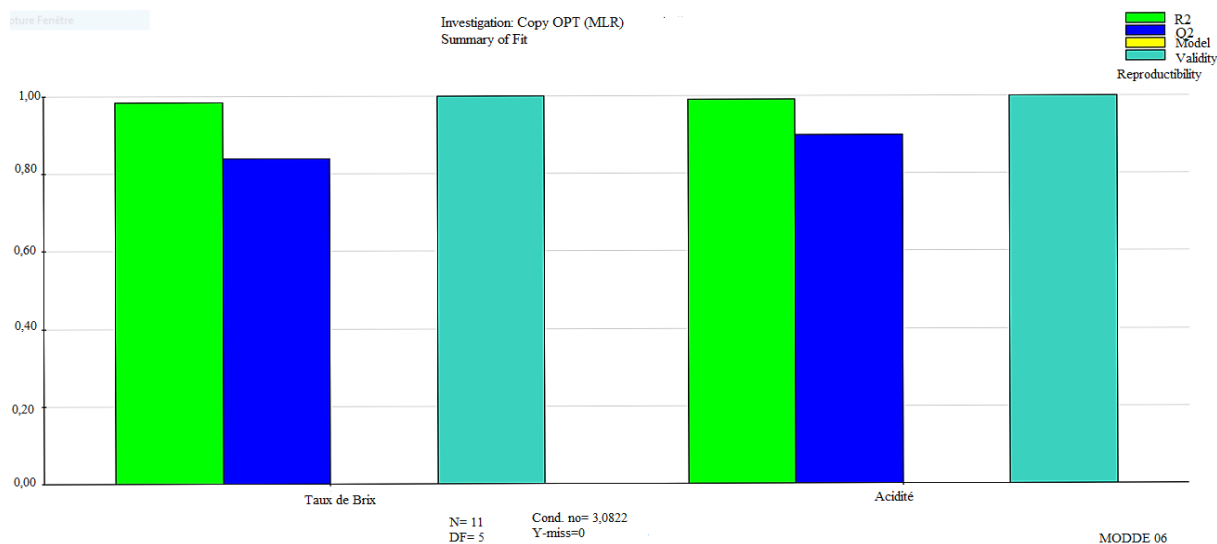


Figure 72 : facteurs statistiques obtenus.

Pour mieux exploiter ces résultats, les valeurs numériques des caractéristiques statistiques les plus pertinents sont résumées dans le **tableau 18**.

Tableau 18 : valeurs numériques des caractéristiques numériques.

Chapitre VI

Résultats et discussions

Réponses	R ₂	Q ₂	Reproductibilité
Brix°	0.984	0.840	1.00
Acidité %	0.990	0.900	1.00

Les paramètres statistiques R₂ et Q₂ traduisent respectivement, l'explication et la prédiction du modèle associé aux résultats obtenus. Lorsque ces deux derniers tendent vers l'unité, le modèle associé explique la variation et prédit la réponse totalement. En revanche lorsque R₂ ou Q₂ tendent vers 0, alors le modèle ne peut être utilisé ni pour expliquer la variation ni la prédiction des réponses.

L'analyse de la variance (ANOVA) partitionne la variation totale de la réponse sélectionnée SS (Somme des carrés par rapport à la moyenne) en une partie dû au modèle de régression et l'autre partie dû aux résidus. De ce fait il est important d'avoir pour une réponse donnée de bons coefficients de corrélation et de prédiction. Dans le cadre de cette étude d'optimisation, nous tiendrons compte des deux paramètres.

Du **tableau 18** on déduit :

- ✓ Pour le Brix° les deux paramètres R₂=0.984 et Q₂= 0,840 sont acceptables, cela veut dire que le modèle obtenu explique et prédit les pourcentages des facteurs (jus de tomate et jus de citron).
- ✓ Pour l'acidité les deux paramètres ont des valeurs R₂ = 0,9990 et Q₂ = 0.900, cela veut dire que le model obtenu explique et prédit avec certitude les valeurs optimisés.
- ✓ Pour la reproductibilité : pour les réponses nous avons une valeur très élevée (1.00), cela indique une maîtrise lors de la préparation des boissons, étant donné que les paramètres figés, autres que ceux qui font l'objet du plan d'expérience, n'ont aucune influence sur les résultats obtenus.

b- Modèle mathématique proposé

Après modélisation, le logiciel MODD 6, nous propose deux équations (**figure 73**), qui à Q₂ prédisent l'influence des facteurs utilisés sur les deux réponses choisies ;

Chapitre VI

Résultats et discussions

Taux de Brix						Acidité														
Factors: 4 (uncontrolled: 0)		Responses: 2		Runs: 11		Objective: RSM		CCF de		Factors: 4 (uncontrolled: 0)		Responses: 2		Runs: 11		Objective: RSM		CC		
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	
1	Taux de Brix	Effect	Conf. int(±)			1	Acidité	Effect	Conf. int(±)			1	Acidité	Effect	Conf. int(±)					
2	Cc	2,66667	0,426171			2	Cc	0,191	0,0235899			2	Cc	0,191	0,0235899					
3	Cc*Cc	-0,736843	0,655862			3	Ct	0,0563334	0,0235899			3	Ct	0,0563334	0,0235899					
4	Ct*Ct	-0,73684	0,655863			4	Ct*Cc	0,0495	0,0288916			4	Ct*Cc	0,0495	0,0288916					
5	Ct	0,666667	0,426171			5	Cc*Cc	-0,0231053	0,036304			5	Cc*Cc	-0,0231053	0,036304					
6	Ct*Cc	0,500001	0,52195			6	Ct*Ct	0,0228947	0,036304			6	Ct*Ct	0,0228947	0,036304					
7						7						7								
8	N = 11	Q2 = 0,840	Cond. no. = 3,0822			8	N = 11	Q2 = 0,900	Cond. no. = 3,0822			8	N = 11	Q2 = 0,900	Cond. no. = 3,0822					
9	DF = 5	R2 = 0,984	Y-miss = 0			9	DF = 5	R2 = 0,990	Y-miss = 0			9	DF = 5	R2 = 0,990	Y-miss = 0					
10		R2 Adj. = 0,968	RSD = 0,2030			10		R2 Adj. = 0,980	RSD = 0,0112			10		R2 Adj. = 0,980	RSD = 0,0112					
11			Conf. lev. = 0,95			11			Conf. lev. = 0,95			11			Conf. lev. = 0,95					
12						12						12								

Figure 73 : modèle proposé pour chaque réponse.

➤ **Pour le Brix° :**

$$Y = b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2$$

$$Y = 0.667X_1 + 2.667X_2 + 0.500X_1 X_2 - 0.737X_1^2 - 0.737X_2^2$$

➤ **Pour l'acidité :**

$$Y = b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2$$

$$Y = 0.056X_1 + 0.191X_2 + 0.0495X_1 X_2 + 0.0228X_1^2 - 0.023X_2^2$$

Avec : X_1 : concentration en jus de tomate (Ct) et X_2 : concentration en jus de citron (cc).

Selon le modèle proposé pour chaque réponse, on remarque que les deux réponses Brix° et acidité sont influencées par les facteurs X_1 et X_2 (ct et cc) ainsi par leurs interactions doubles X_1^2 et X_2^2 (ct*ct et cc*cc), aussi par l'interaction entre les facteurs $X_1 X_2$ (ct*cc).

c- Analyse des effets propres des facteurs sur les réponses

Les **Figures 74 et 75** représentent respectivement les effets propres des facteurs sur le Brix° et sur l'acidité.

Il y a des facteurs qui ont une influence positive sur les réponses (barre dirigée vers le haut), et ceux qui influent négativement sur les réponses (barre dirigée vers le bas). Aussi, plus le facteur est intense, plus il aura une influence importante sur les réponses.

Chapitre VI

Résultats et discussions

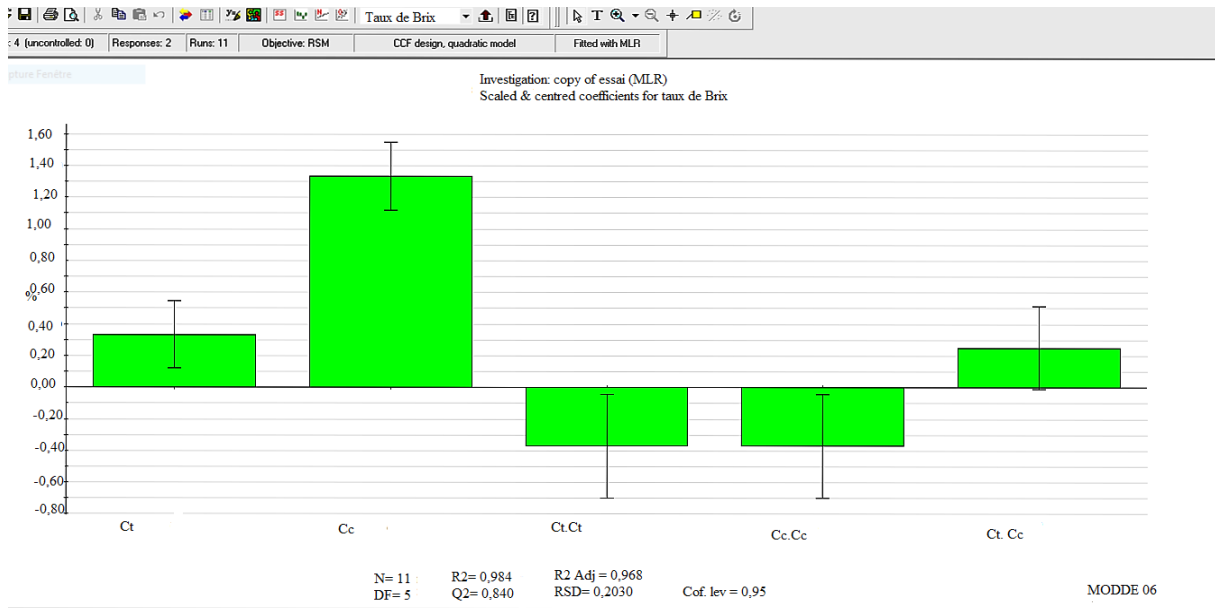


Figure 74 : Histogramme représentant l'influence des facteurs sur le Brix°.

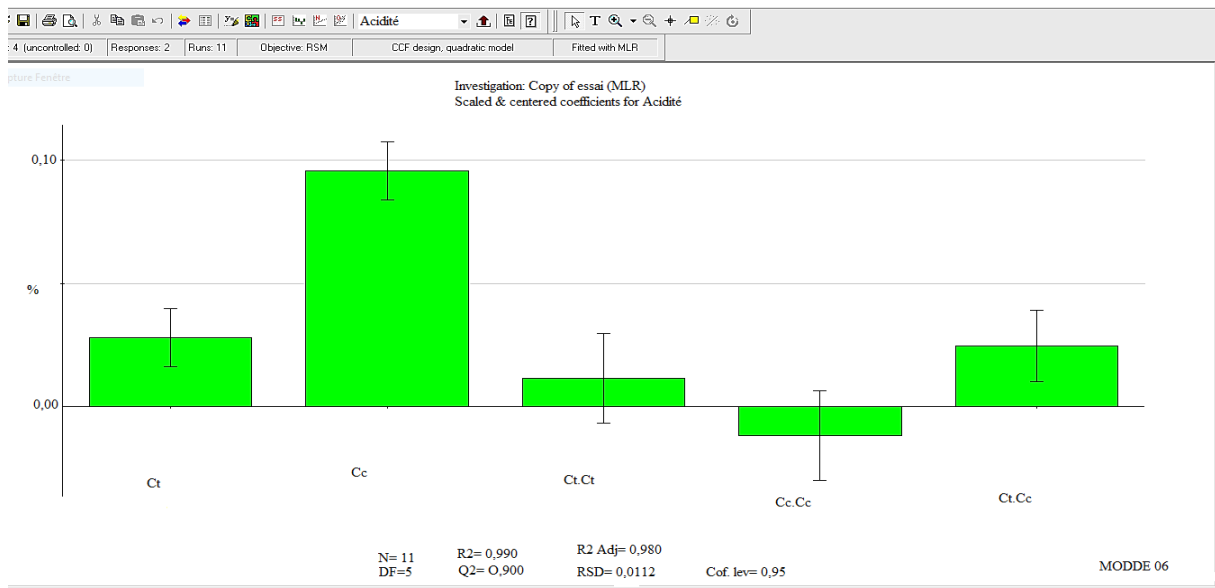


Figure 75 : Histogramme représentant l'influence des facteurs sur l'acidité.

Les interactions entre les jus utilisées pour la formulation sont à l'origine de la composition chimique de chacun des deux ingrédients.

La figure 74 montre que :

La concentration en jus de citron pur influence positivement et d'une manière plus importante, car il présente une croissance significative du degré de Brix, cela peut être expliqué par le fait que ce dernier est plus riche en sucre soluble que le jus de tomate pur.

Résultats et discussions

L'effet des interactions (jus de citron- jus de tomate) est positif sur le degré Brix d'une manière moins importante, cela peut être expliqué par le fait qu'il y'aura un effet de compétition entre les molécules de sucre et d'autre molécules en solution, ayant comme conséquence, la diminution de la quantité de sucre dissoute et par suite la diminution de degré de Brix.

L'effet des interactions « doubles » est considérablement négatif sur le degré Brix et non significatif.

La **figure 75** montre que :

La concentration en jus de citron pur influence positivement et d'une manière plus importante, car il présente une croissance significative de l'acidité, cela peut être expliqué par le fait que ce dernier est plus en acide citrique et en acide ascorbique (vitamine C) que le jus de tomate pur.

L'effet des interactions (jus de citron- jus de tomate) est positif sur l'acidité d'une manière moins importante, cela peut être expliqué par le fait qu'il y'aura un effet de compétition entre les molécules d'acide citrique et d'autre molécules en solution et aussi une dégradation partiel de la vitamine C, ayant comme conséquence, la diminution d'acidité.

L'effet des interactions « double ; jus de tomate- jus de tomate » est considérablement moins positif sur l'acidité et non significatif.

L'effet des interactions « double ; jus de citron- jus de citron » est négatif sur l'acidité et non significatif.

2- Détermination de l'optimum

En introduisant les valeurs cibles dans le logiciel :

- ✓ Le Brix° : de 10° à 12°
- ✓ L'acidité : de 0.3% à 0.4%

Et en utilisant les équations de modélisation, ce dernier nous propose un optimum et un domaine d'optimalité.

Tableau 19 : valeurs ciblent du Brix° et de l'acidité.

Chapitre VI

Résultats et discussions

MODDE - essai.mip - [Optimizer]

File Edit View Design Worksheet Analysis Prediction Show Window Help

Taux de Brix

Factors: 4 (uncontrolled: 0) Responses: 2 Runs: 11 Objective: RSM CCF design, quadratic model Fitted with MLR

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1 Concentration tomate	Free		97	100
2 Concentration citron	Free		0	3
3 Concentration I	Constant	0,2		
4 Concentration sucre	Constant	6		

Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 Taux de Brix	Minimize	1		9,56859	9,82525
2 Acidité	Minimize	1		0,236238	0,267542

D'après les résultats de Brix° et de l'acidité, la formulation optimale correspondra à la position optimale des facteurs de formulation considérés à savoir : la concentration en jus de tomate et la concentration en jus de citron susceptibles de conférer aux grandeurs observées que sont les réponses : Brix° et acidité, des valeurs cibles en utilisant les techniques d'optimisation des réponses.

Les concentrations en jus utilisés correspondante à la formule optimale sont résumées dans le **tableau 20**. Selon le tableau 20, notre optimum est très proche et presque identique à la boisson B7 de point de vue composition et de point de vue physicochimique (Brix° et acidité).

Tableau 20 : obtention de l'optimum.

Iteration: 101 Iteration slider: _____

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Concentration tomate	Concentration citron	Concentration I	Concentration sucre	Taux de Brix	Acidité	iter	log(D)
1	98,3177	0			10	0,3001	96	0,5435
2	98,2766	0	0,2	6	10	0,3001	101	0,5434
3	98,3025	0,0001			10	0,3001	76	0,5435
4	98,267	0			10	0,3001	77	0,5435
5	98,2766	0			10	0,3001	101	0,5434
6	98,3177	0			10	0,3001	96	0,5435
7	98,2766	0			10	0,3001	101	0,5434
8	98,267	0			10	0,3001	77	0,5435

V- Caractérisation physicochimique de l'optimum

L'intérêt de cette étape est de valider expérimentalement la boisson retenue en vérifiant sa conformité aux exigences alimentaires. Les résultats des analyses physicochimiques effectuées pour la boisson optimale (B7) du jus de tomate sont résumés dans le **tableau 21**.

Chapitre VI

Résultats et discussions

Tableau 21 : résultats d'analyses physicochimiques effectuées sur l'optimum.

Boisson/Caractéristique	PH	Brix °	Acidité %	Viscosité mPa/s	Vitamine C (g/100ml)	Polyphénols totaux (mg Ag/100ml)	Activité anti oxydante %
La formule optimale (B7)	4.21	10	0.308	230	1.84	2.2	31.92

D'après les résultats d'analyses physicochimique de l'optimum illustrés dans le **tableau 21**, on remarque, que ce dernier est caractérisé par un pH acide qui est égale à 4.21, un taux de brix de 10°, une acidité de 0.308% en acide citrique et une viscosité de 230 mPa/s. ces résultats sont déjà discutés dans une partie précédente (pages 102-108). Aussi, cette boisson est caractérisée par des concentrations de 1.84g/100ml en vitamine C et de 2.2mg équivalent d'acide gallique/ 100ml en poly phénols totaux, et par un pourcentage de 30.92% d'activité antioxydante.

La teneur en vitamine C dans la boisson obtenue, exprimée en g d'acide ascorbique contenue dans 100 ml de boisson pasteurisé est très faible par rapport aux valeurs obtenues lors de l'analyse d'un ensemble des jus de tomate par (**Ait Boudjema. N, 2014**), ces valeurs sont comprises entre 23 et 27 g/ 100ml. Ceci peut être expliqué par l'effet de dilution mais aussi par d'autres facteurs qui sont responsables de cette dégradation, la vitamine C est particulièrement sensible à l'oxydation et par conséquence aux catalyseurs d'oxydation (métaux), à la chaleur et à la lumière [**Jadot, 1994**].

Le dosage des poly phénols totaux, nous donne une estimation globale de la teneur en différentes classes des composés phénoliques contenus dans la boisson. La teneur en poly phénols dans la boisson obtenue, exprimée en mg d'acide gallique contenue dans 100 ml de boisson pasteurisé est très faible par rapport aux valeurs obtenues lors de l'analyse d'un ensemble de variétés de la tomate par (**Anderson. M et al, 2021**), ces valeurs sont comprises entre 6 et 9.96 mg/ 100g de la matière sèche. Ceci peut être expliqué par le fait que, La cuisson ou l'exposition à de fortes températures provoquent une diminution de la teneur en poly phénols totaux de la plupart des fruits et légumes (**Ngoh Neewilah et al, 2005**), en parallèle, (**Bernard et carlier, 1992**). **Roy et al. (2007)** ont rapporté que la cuisson de

Résultats et discussions

certaines légumes à une température de 100°C (10 à 30 min) affecte leur teneur en composés phénoliques et leur activité antioxydante.

Les antioxydants sont des substances qui contrecarrent les radicaux libres et préviennent leurs dégâts, ils sont capable d'interagir sans danger avec les radicaux libres et de mettre fin à la réaction en chaîne avant que les molécules vivantes ne soient endommagées (**Ratnam et al, 2006**). La valeur de cette activité donnée par la boisson analysée est de 30.92%, indique que cette dernière possède une fraction considérable en antioxydants comme la vitamine C, les poly phénols et les caroténoïdes de grand pouvoir réducteur.

VI- Caractérisation sensorielle des boissons formulées

Le test de dégustation pour les 9 boissons formulées (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9), a été réalisé avec une épreuve de notation sur échelle de 1 à 9 points. Nous avons attribué des proportions aux valeurs numériques ou appréciations des dégustateurs pour les paramètres suivants : la couleur, l'odeur, l'arome, le goût acide, le goût sucré, l'arrière goût et la texture. L'analyse numérique des appréciations des jurys est réalisée par un logiciel spécialisé appelé XLState. Cet outil a pour but de permettre aux spécialistes de l'analyse sensorielle de disposer d'un outil simple et puissant pour mettre en place une étude sensorielle menée auprès de juges (experts et/ou consommateurs) évaluant un ensemble de produits (**Perinel et Pages, 2004**).

1- Caractérisation des produits

Ce test permet de caractériser rapidement les échantillons des produits nommés BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6 et BT7 perçus par le jury experte, donc il s'agit d'identifier les descripteurs ou les attributs sensorielles qui discriminent le mieux les produits, et ainsi de déterminer les caractéristiques importantes de ces derniers (**Husson et al., 2009**).

a- Pouvoir discriminant par descripteur « attribut sensoriel »

Ce test permet de représenter les attributs sensorielles des produits dégustés par le jury expert, ordonnés de celui ayant un pouvoir discriminatif fort jusqu'au celui ayant le pouvoir discriminatif le plus faible en fonction de p-value, les résultats sont représentés dans la **figure 75** ci-dessous.

Résultats et discussions

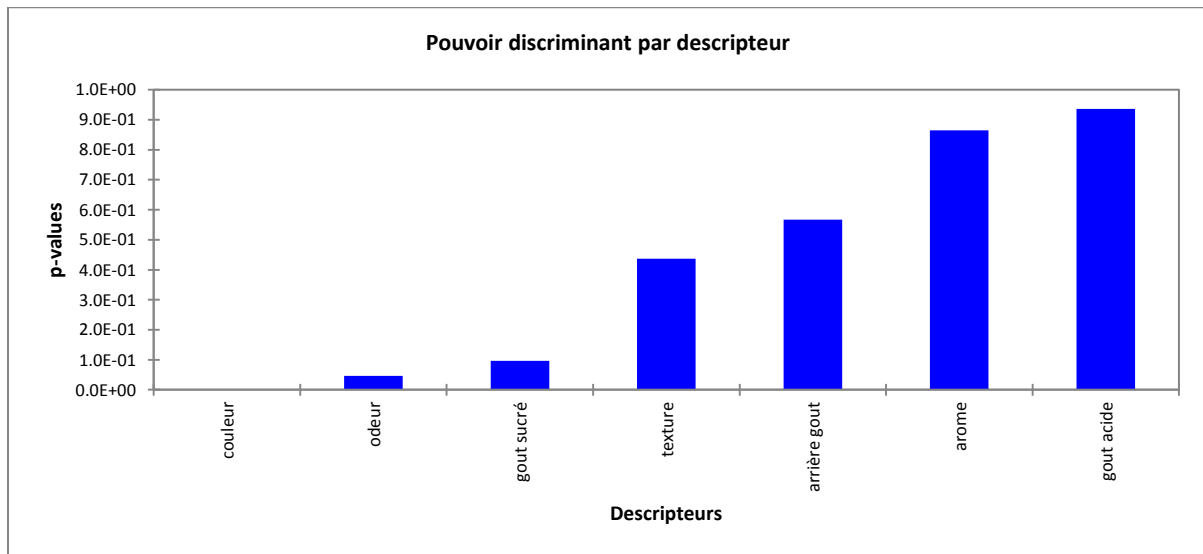


Figure 76: Pouvoir discriminant par descripteur des boissons préparées.

La **figure 76** montre que, les attributs sensoriels ayant plus fort pouvoir discriminant sont la couleur, l'odeur, suivi de gout sucré des boissons préparées, cela signifie que les experts ont constaté des différences sensorielles au niveau de ces descripteurs pour les 7 boissons. La texture et l'arrière goût ont un pouvoir discriminant moyen, ce qui signifie que les experts ont constaté une légère différence entre les produits dégustés. Cependant l'arôme et le goût acide n'ont aucun pouvoir discriminant.

b- Coefficient des modèles

Dans ce test sont affichés, pour chaque descripteur et pour chaque produit, les coefficients du modèle sélectionné. Le modèle utilisé dans cette étude est "Note descripteur = effet produit + effet juge + effet session". L'intérêt de ce dernier est d'évaluer la performance globale du panel expert selon trois facteurs (produit, juge et répétition) pour chaque descripteur (**Pagès et al, 2006**). Pour chaque produit une représentation graphique des coefficients étaient associés aux différents descripteurs. Quand ça apparaît en bleu, c'est que le coefficient du descripteur est positif (apprécié), en rouge, le coefficient est significativement négatif (non apprécié). Alors qu'en blanc, ça signifie que les caractéristiques n'ont pas été détectées. Les résultats sont présentés dans les **figures 77** ci-dessous.

Chapitre VI

Résultats et discussions

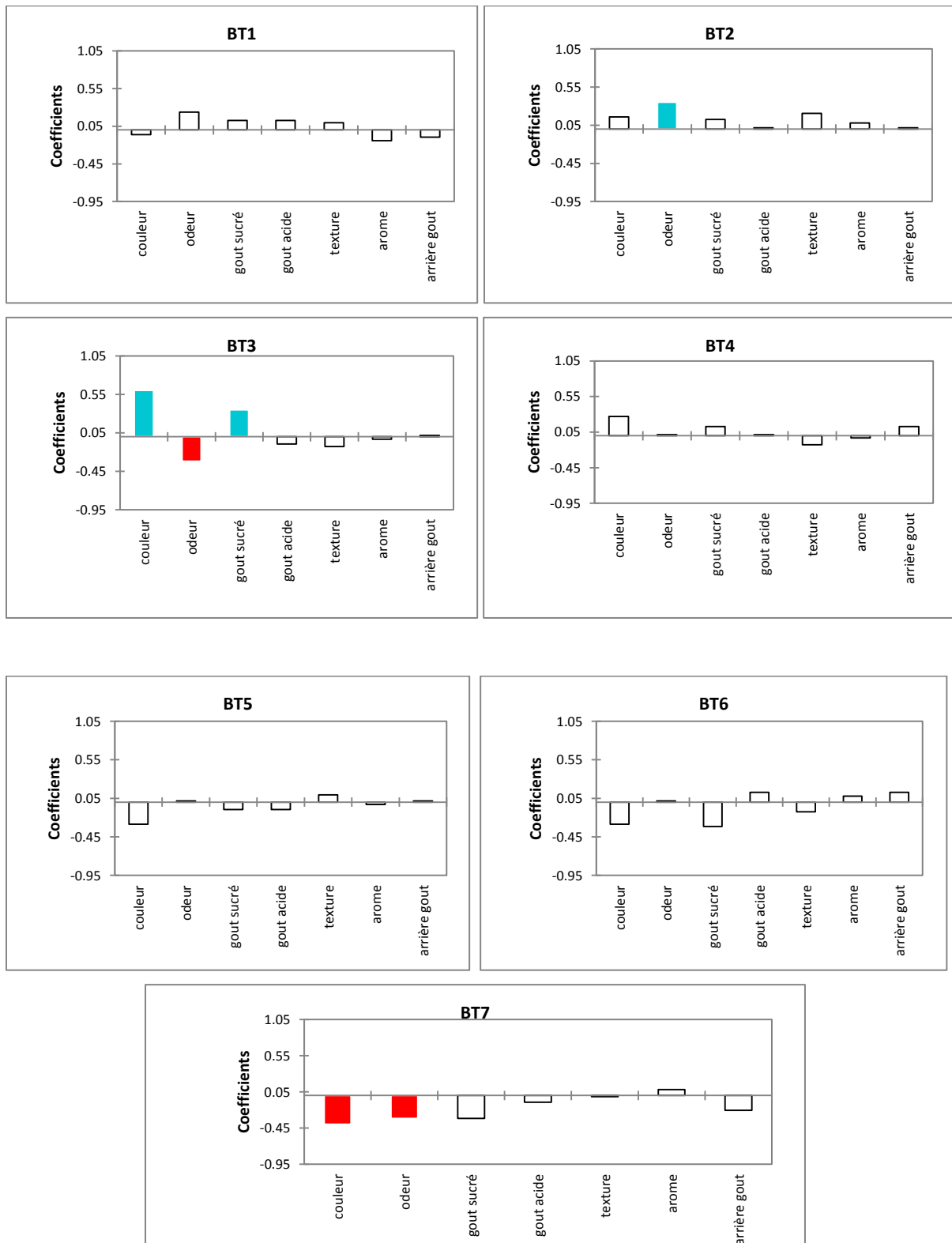


Figure 76 : Coefficients des modèles des boissons dégustées

Résultats et discussions

Les graphiques de la figure précédente permettent de définir l'appréciation ou le non appréciation des descripteurs des deux échantillons de margarine A et F par les jurys experts. Les résultats sont notés comme suit :

- ✓ **BT1, BT4, BT5 et BT6** : l'ensemble de leurs descripteurs sont affichés en blanc, ces derniers ne sont pas significatifs donc les membres de jurys n'ont pas pu détecter les caractéristiques de ces produits. Les quatre échantillons précédemment cités n'ont aucun descripteur apprécié par nos experts.
- ✓ **BT2** : la figure illustre que l'odeur, présentée en bleu, est la seule caractéristique détectée de la part des membres de jurys, c'est-à-dire que le descripteur odeur de la boisson BT2 est apprécié par l'ensemble des jurys experts. En blanc, sont affichées les caractéristiques du produit qui ne sont pas détectées par les jurys. Donc en résumé, la boisson BT2 est caractérisée par un arôme agréable et marqué.
- ✓ **BT3** : la figure illustre que la couleur et le goût acide, présentés en bleu, sont les seules caractéristiques détectées de la part des membres de jurys, c'est-à-dire que les descripteurs couleur et goût acide de la boisson BT3 sont appréciées par l'ensemble des jurys experts. En rouge, la caractéristique odeur n'est pas appréciée par tous les jurys et en blanc, sont affichées les caractéristiques du produit qui ne sont pas détectées par les jurys. Donc en résumé, la boisson BT3 est caractérisée par une couleur agréable et un goût acide marqué et une odeur désagréable.
- ✓ **BT7** : en rouge, les caractéristiques 'couleur' et 'odeur' ne sont pas appréciées par tous les jurys et en blanc celles que les membres de jurys ne sont pas arrivés à les détecter. Ce qui nous amène à conclure que la boisson BT7 n'a pas une bonne odeur ni une bonne couleur.

c- Moyennes ajustées par produit

L'objectif de ce test est de définir : les moyennes ajustées calculées à partir du modèle pour chaque combinaison descripteur-produit. Les résultats des moyennes ajustées par produit sont présentés dans le **tableau 22**.

Tableau 22: moyennes ajustées par produit.

Chapitre VI

Résultats et discussions

	gout sucré	couleur	arrière gout	odeur	gout acide	texture	arome
BT3	2,556	3,111	1,222	2,333	2,222	2,667	2,667
BT4	2,333	2,778	1,333	2,667	2,333	2,667	2,667
BT1	2,333	2,444	1,111	2,889	2,444	2,889	2,556
BT2	2,333	2,667	1,222	3,000	2,333	3,000	2,778
BT5	2,111	2,222	1,222	2,667	2,222	2,889	2,667
BT6	1,889	2,222	1,333	2,667	2,444	2,667	2,778
BT7	1,889	2,111	1,000	2,333	2,222	2,778	2,778

Le tableau des moyennes ajustées par produit permet de ressortir les moyennes lorsque l'on croise les différents produits et les caractéristiques. Les couleurs correspondent, pour le bleu, à un effet significativement positif du descripteur sur le produit et, pour le rouge, à un effet significativement négatif du descripteur sur le produit. Les résultats sont affichés comme suit :

- ✓ Pour la boisson **BT3**, nous remarquons que les descripteurs couleur et gout sucré ont un effet significativement positif sur le produit, et le descripteur odeur a un effet significativement négatif
- ✓ Concernant la boisson **BT2**, nous remarquons que, le descripteur odeur a un effet significativement positif sur le produit ;
- ✓ Pour la boisson **BT7**, nous remarquons que les descripteurs couleur et odeur ont un effet significativement négatif sur le produit.
- ✓ Et pour les autres boissons **BT1**, **BT4**, **BT5** et **BT6**, les différents caractéristiques n'ont ni un effet significativement positif ni un effet significativement négatif sur les produits.

2- Cartographie externe de préférence (PREFMAP)

Cette méthode permet de relier les préférences exprimées par les consommateurs aux attributs sensorielles des produits sur une même représentation graphique (en deux ou trois dimensions). La réalisation d'une cartographie externe de préférence, nécessite deux types de données :

- ❖ Les notes d'acceptabilité attribuées par le consommateur pour chaque échantillon afin de réaliser une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ;
- ❖ Les moyennes données par les experts pour chaque attribut étudié pour effectuer une Analyse en Composante Principale (ACP).

Résultats et discussions

a- Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH est une méthode de classification des consommateurs (panel naïf) en groupes homogènes de classe selon leur notation de préférence pour chaque produit *figure 78*, ces résultats permettent de visualiser les données en classes homogènes (Everitt *et al*, 2011) afin de faciliter l'interprétation des résultats de cartographie externe de préférence.

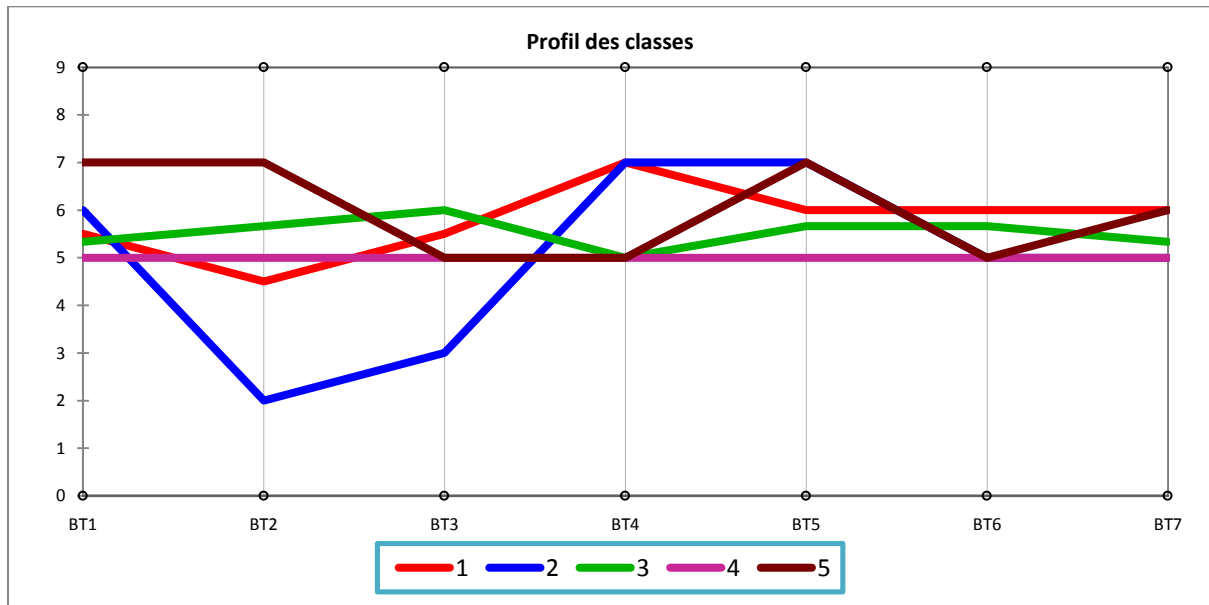


Figure 78 : Profil des différentes classes créées de panel naïf, selon les notations de préférence des boissons dégustées, à savoir BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6 et BT7.

D'après la **figure 78**, cinq classes ont été formées à partir des notes de préférences de panel naïf (consommateur).

- ✓ La première classe avait préférée la boisson BT4.
- ✓ La deuxième classe avait préférée les boissons BT4 et BT5.
- ✓ La troisième classe avait préférée la boisson BT3.
- ✓ La quatrième classe n'avait aucune préférence.
- ✓ La cinquième classe avait préférée les boissons BT1, BT2 et BT5.

b- Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est l'une des méthodes d'analyse de données multi variées aux quel les observations (les produits) sont décrites par un ou plusieurs variables (les attributs sensorielles). Cette méthode consiste à transformer et réduire le nombre de variables corrélées en nouvelles variables non corrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales", qui peuvent être visualisées graphiquement, avec la conservation

Résultats et discussions

d'un maximum d'information (Jolliffe, 2016 ; Kassambara, 2017). La carte de la **figure 79** permet de représenter les corrélations entre les variables et les facteurs par l'ACP.

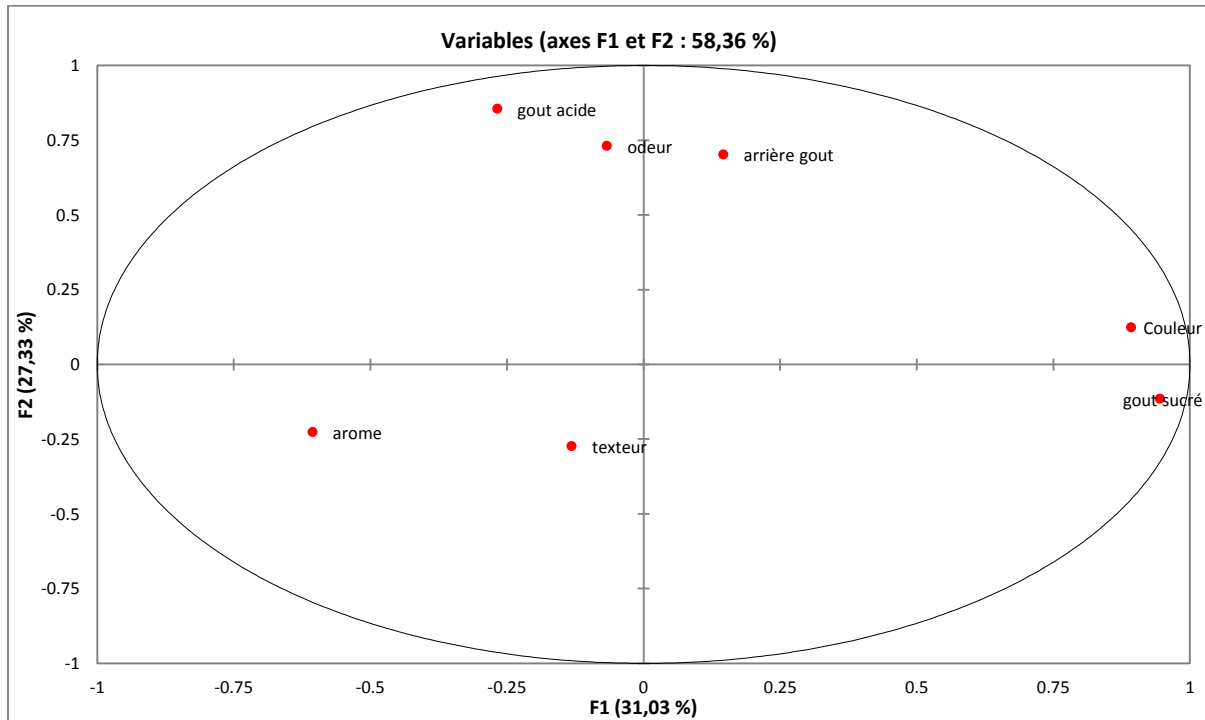


Figure 79 : corrélation entre les variables et les facteurs du panel expert, pour les boissons dégustées.

D'après la **figure 79**, la qualité de représentation est assez bonne puisqu'elle permet de représenter le niveau de variabilité des variables dans le cercle qui est respectivement de 27,33% et 31,03%, et qui permet de constater que les boissons dégustées ont été perçues par le panel expert comme produits assez différents.

c- Synthèse cartographie externe de préférence (PREFMAP)

Ce test a été réalisé dans le but de connaître les préférences des consommateurs (panel naïf) vis-à-vis les produits étudiés. L'application du test de la cartographie externe de préférence permet d'afficher la carte des préférences, ainsi la courbe de niveau. Les deux figures courbes de niveau et cartes de préférences sont fusionnées. Les résultats sont présentés dans la **figure 80**.

Résultats et discussions

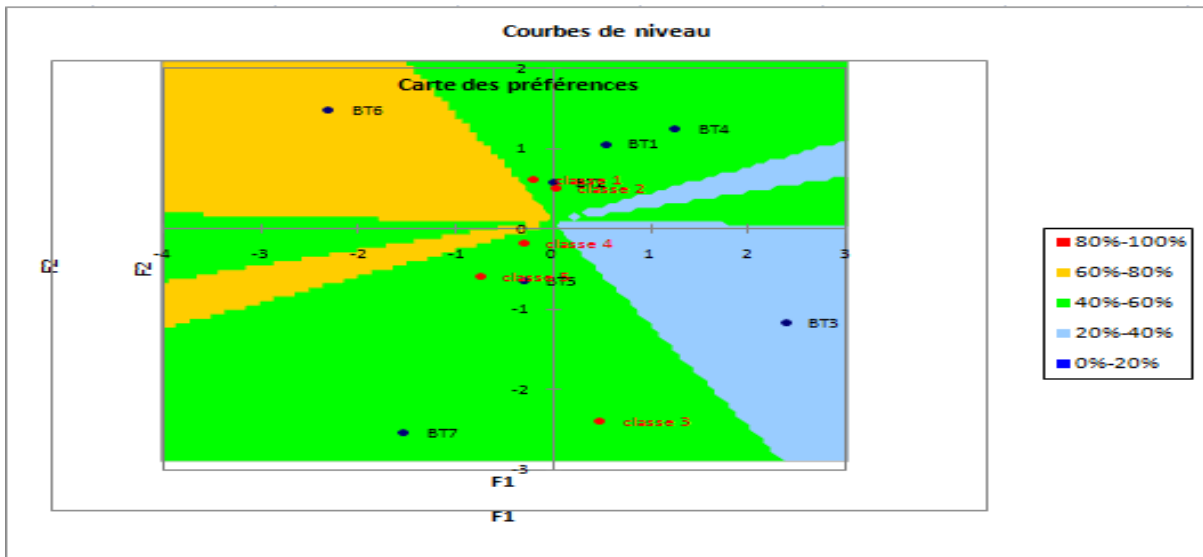


Figure 80: carte des préférences et la courbe de niveau des produits étudiés nommés BT1 BT2, BT3, BT4, BT5, BT6 et BT7.

La représentation graphique de courbe de niveau permet de visualiser le pourcentage d'appréciation des boissons dégustées et le **tableau 23** nous donne directement le pourcentage d'appréciation pour chaque boisson.

Tableau 23 : pourcentages d'appréciation des boissons dégustées.

Objet	%
BT1	40%
BT2	40%
BT3	20%
BT4	40%
BT5	60%
BT6	80%
BT7	60%

En conclusion, l'étude de la cartographie sensorielle des préférences des boissons dégustées à savoir BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6 et BT7 avait révélé que la boisson BT6 (B8) est apprécié à 80% et les boissons BT5 et BT7 (B7 et B9) sont appréciées à 60%, les boissons BT1, BT2 et BT4 (B3, B4 et B6) sont appréciées à 40% et enfin, la boisson BT3 (B5) est appréciée à 20%.

Conclusion



Conclusion

La tomate, fruit largement consommé frais ou bien sous forme transformée. Reconnu pour ces qualités nutritionnelles. Riche en antioxydants, tels les caroténoïdes (lycopène en particulier), des composées phénoliques et la vitamine C. La tomate a donné lieu au développement d'une importante industrie de transformation, pour la production de concentrés, de sauces, de jus et de conserves. Compte tenu de son importance économique, elle est l'objet de nombreuses recherches scientifiques.

Au cours de ce travail, Le plan D-optimal, nous a proposé 12 essais dont trois de répétition. Après les avoir réalisés, nous avons déterminé pour chacun d'entre eux, son degré brix et son acidité titrable. Le MODDE 6, nous a permis d'obtenir les proportions optimales de la formulation de notre jus de tomate, elle s'agit de la boisson **B7**. L'étude des effets des facteurs sur les réponses du plan d'expérience, nous a permis de comprendre l'effet de chaque ingrédient sur les paramètres physicochimiques (Brix° et acidité titrable) de notre boisson.

L'évaluation sensorielle permet d'étudier les caractéristiques sensorielles des produits en faisant intervenir l'homme comme instrument de mesure à partir de ses cinq sens : l'odorat, le goût, la vue, l'audition et le toucher. Elle permet d'étudier différents problèmes ou de répondre à diverses questions posées par le fabricant. C'est une étude dont le but est de connaître d'une part quelles sont les caractéristiques qui mettent en valeur les différents échantillons évalués, et d'autre part quel est le produit préféré par le consommateur, en appliquant un logiciel nommé XLSTAT-MX. Ce dernier, nous a permis de sélectionner les boissons satisfaisantes sur le plan sensoriel à savoir, les boissons **B8 (BT6)**, **B7 (BT5)** et **B9 (BT7)**.

En guise de perspectives, il serait intéressant d'enrichir et compléter ce travail en :

- ✚ Réalisant une analyse microbiologique pour assurer une bonne qualité hygiénique ;
- ✚ Faisant une étude de stabilité en temps réelle pour déterminer la date limite de conservation (DLC) ;
- ✚ Faisant un test de stabilité de la vitamine C et d'autres nutriments lors de stockage de notre boisson pour déterminer les conditions appropriées pour les préserver; autrement dit, déterminer l'emballage le plus efficace pour la conservation de notre produit ;
- ✚ Exploitant les déchets prévenants de la transformation des fruits lors de fabrication de notre jus tel que, la peau et les graines de fruits de tomate ;

Conclusion

La transformation des fruits de tomate est susceptible de générer des quantités importantes de sous produits et de déchets pouvant atteindre 30% des volumes de fruits traités. Ces déchets sont représentés par les pelures et surtout par les graines, ils sont souvent à l'origine de problèmes d'ordre technique, économique et environnemental et même écologique. La valorisation des sous produits de l'industrie de transformation des fruits de tomate a fait l'objet de nombreux travaux.

Références bibliographiques

A

- **Addil el Akkad, 1993.** Etude comparative des perturbations de la couche limite et de la portance, sur plaque plane et sur modèle d'aile en présence de fluides désirants. Exigence partielle pour l'obtention de garde de maître en science appliquées. Université du Québec à Chicoutimi. P : 46-50.
- **AFNOR (1986).** . Jus de fruits et de légumes: spécification et méthodes d'analyse. 2^{ème} éd, Tour Europe, Paris, 155 p.
- **Ait Boudjema Naoual, 2014/2015.** Effet de cinq doses de fertilisation potassique sur la qualité nutritionnelle chez une variété de la tomate industrielle « Riogrand » (*Lycopersicon esculentum Mill*), cultivée en plein champ. P : 55, 59.
- **Alavoine F., Crochon M., Fady C., Favot J., Moras P., Pech J.C. (1988).** La qualité gustative des fruits. Méthodes pratiques d'analyses. PP : 7-18.
- **Alioui Sara, 2020.** Etude de la qualité physicochimique et microbiologique de la conserve du concentré de tomate (ZIMBA). P : 32-33.
- **Amiot J, Fournier S, Lebeuf Y, Paquin P et Simpson R, 2002.** Composition, propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologie et technique d'analyse du lait. In science et technologie du lait. Transformation du lait. Ed. Ecole polytechnique de Montréal. PP : 1-6.
- **Anonyme, (2005).** Codex Alimentarius.
- **Anonyme, (2017)**
<http://sante.journaldesfemmes.com/calories/classement/aliments/vitamine-c>.
- **Anonyme a, 2017:** le marché des boissons sans alcool.<http://www.agroligne.com>.
- **Anonyme b, 2017:** Panorama des industries agro-alimentaires
<http://www.agriculture.gouv.fr>
- **Ayouaz Sabrina, Benmamas Fatima, 2017.** Etude de la viscosité de quelques produits de CEVITAL. Mémoire de Master en Sciences Alimentaires. Université Abderrahmane Mira. Bejaïa. P 5-7.

B

- **Bedad .A, Bouhadja. M, Hamdi. H. 2018**, Essai de formulation d'un jus de tomate, Master de l'Université 08 Mai 1945 Guelma.
- **Beecher. G-R.**, (1998), " Nutrient content of tomatoes and tomato products". p (98–100).
- **Bellili. S, Khenouce. L, 2012/2013**. Effet de la cuisson sur la physico-chimie et l'activité antioxydante de la tomate. P : 6.
- **Ben-Aziz, A., Britton, G., and Goodwin, T. W.** (1973) Carotene epoxides of *Lycopersicon esculentum*, *Phytochemistry*. p (12, 2759-2764).
- **Bernard A. et Carlier H. (1992)**. Aspect Nutritionnels des constituants des aliments, influence des technologies. Edition. 8ème éditions. *Tec et Doc*, Lavoisier, Paris. pp: 94-95.
- **B.I.H.A.**, 2009 - Fiche variétale d'agrumes. Maroc, n° 14377, p. 25.
- **Blanca J., Montero-Pau J., Sauvage C., Bauchet G., Illa E., Diez M.J., Francis D., Causse M., van der Knaap E., Cañizares J.** (2015) Genomic variation in tomato, from wild ancestors to contemporary breeding accessions. *BMC Genomics* 16:257.
- **Boidin M., Abtroun A., Boudra A., Jolibert F., Tirarde A et Touaibiah. (2005)**. Etude de la filière boissons. Algérie 2005. Rapport principal. Euro Développement Pme. Algérie, Juin 2005.
- **Boiron A. (2008)**. Les décrets permettraient de fixer et faire respecter les catégories. Ed. La revue de l'industrie agroalimentaire, Algérie. PP 30.
- **Boiron A., Arvault G. (2008)** Boissons montées en gamme. Ed. La revue de l'industrie agroalimentaire Algérie, pp 29.
- **Boudissa F, 2011**. Influence des radiations micro-onde sur l'extraction de l'huile de grignon d'olive imprégné de margine. Thèse de magister : chimie de l'environnement. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou.
- **Bouguerra Ali, 2012**. Etude des activités biologiques de l'huile essentielle extraite des grains de *Foeniculum vulgare* Mill, en vue de son utilisation comme conservateur alimentaire.
- **Boukhiar A. (2009)**. Analyse du processus traditionnel d'obtention du vinaigre de dattes tel qu'appliqué au sud Algérie : essai d'optimisation. Mémoire de magistère, centre universitaire de Boumerdes. 45-52.
- **Brand-williams W, Cuvelier ME, Berset C.** use of a free radical method to evaluate antioxydant activity. *LWT-Food sci Technol.* **1995**, p : 25-30.

- **Brebion G., Carcoue T. et Marc Rauphie J. C.,** 1999 - L'histoire des agrumes. Ed. S.E.V.E, Service des Espaces Verts et de l'Environnement.

C

- **Chaïb J.** 2007. Caractérisation des déterminants génétiques et moléculaires de composantes de la texture du fruit de tomate, Ecole Nationale Supérieure de Montpellier.
- **Chaux Claude, Foury Claude.** 1994, la production légumière, tome 1, généralités. ISBN 9782852069732. P 45.
- **Cheftel J. C., Cheftel H. (1986)** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris II, pp 47-52.
- **Claudian J. (1986)** Boisson. Les aliments «Manuel d'alimentation humaines». Ed., E.S.F, Paris, II, pp 399-400.
- **Codex Alimentarius. (2005)** Norme générale codex pour les jus et les nectars de fruits.
- **Claude bureaux,** 2013. Mes tomates de jardin ...à la cuisine, bien choisir ses variétés. Rédaction et conception par Stéphane morarde février 2013. P 2-3.

D

- **Danneylles, Jean Luc,** 1999. Chronique de potager ; la tomate. ISBN 9782742721498.
- **Davies JN, Hobson GE. 1981.** The constituents of tomato fruit - the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, p (15: 205-280).
- **Den Ouden, F. W. C. & Van Vliet, T. (1997).** Particle size distribution in tomato concentrate and effects on rheological properties. *Journal of Food Science*, 62(3), 565-567.
- **Diaz, J. V., Anthon, G. E. & Barrett, D. M. (2009).** Conformational Changes in Serum Pectins during Industrial Tomato Paste Production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. P : 8453-8458.
- **Dossou. J, Soulé. L, Montcho. M, 2007.** Evaluation des caractéristiques physicochimiques et sensorielles de la purée de tomate locale produite à petite échelle au Bénin. P : 119-124.

E

- **Echeverria E. Valich J. (1989).** Enzymes of sugar and acid metabolism in stored Valencia orange. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114, 445-449.
- **Ercan, B. et Ilhami, G.U. (2011).** Poly phénol contents and *in vitro* antioxydant activites of lyophilised aqueous extract of kiwi fruit (*actinidiadeliciosa*). *Food research international*, 44: 1482-1489.
- **Espirad, E., 2002** introductions à la transformation industrielle des fruits end tec à doc.
- **Espirad, E. (2002)** Introduction à la transformation industrielle des fruits. Ed., TEC et DOC, Lavoisier, Paris, pp 6, 12, 52, 162, 305-309.
- **Espirad, E.2002.** Introduction à la transformation industrielle des fruits. éd Tec et Doc, 11 Rue Lavoisier 75008 Paris, 2002.ISBN :2-74 30-0526-2.
- **Espirad, E. (2002).** Introduction à la Transformation Industrielle des Fruits. Technique et Documentation. Lavoisier. Paris. PP. 5-218.
- **Everitt, B., Landau, S., Leese, M., Stahl, D., (2011).** *Cluster analysis*. 5 éd. London Wiley- Blackwell, Wiley Series in Probability and Statistics, 346p. ISBN: 978-0-470-74991- 3.

F

- **Fao Stat.** 2013, Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- **Favier J. C. (1995)** Répertoire général des aliments. Paris: INRA, CNEVA, CIQUAL, TEC& DOC.
- **Fredot E. (2007)** Connaissance des aliments ; bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris.

G

- **Gautier, H., Bernard, C., Bourgade, F., Grasselly, D., Navez, B., Caris-Veyrat, 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. p (4112-4123).
- **Gallais. A & Bannerot. H. 1992,** Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélections – INRA. p. 379-391.
- **Gissinger R. (2003).** Les vitamines dans les jus de fruits. In Les vitamines dans les industries alimentaires, pp. 388 [C Bourgeois, editor]. Paris: TEC &DOC, Lavoisier.

- **Guy A., Varouquaux P et Montigaud J. (2002).** Technologie de transformation des fruits. Tec & Doc éditions. Paris. Collection sciences et techniques agroalimentaires.
- **Gonzalez-Molina, E; .Dominguez-perles, R.; Moreno, D. a. et Garcia-viguera. (2010).** natural bioactive compounds of *citrus limon* for food and Health. *journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 51: 327-345.
- **Gollouin F, Tonelli N .2013** .Des fruits et légumes et des grains comestible du monde entier. Edition : Briyitte Peyrot. Poos, Paris Lavoisier.
- **Goupy Jacques, 2006.** Les plans d'expériences p : 100-112.
- **Goupy Jacques, Lee Creighton, 2005.** Introduction aux plans d'expériences. P : 1-11.
- **Goodman, C. L., Fawcett, S. & Barringer, S. A. (2002).** Flavor, viscosity, and color analyses of hot and cold break tomato juices. *Journal of Food Science*, **67**(1), 404-408.

H

- **Hama Fayza, Asloun Hanane, 21/6/20117.** Effet d'association d'extrait de pulpe d'orange et citron sur l'activité antioxydante. Mémoire Master II. Université de Bejaïa.45p.
- **Harris G.G., Brannan R.G.2009.** Apriliminary evaluation of antioxydant comprouds, reducing potentiel, and radical scavening of pawpaw, (*Asimia tribloba*) fruit pulp from different stages of ripeness. *LWT-Food science and Technology*. P : 42 :275-279.
- **Husson, F., Lê, S., Pagès, J., (2009)** SensoMineR dans Evaluation sensorielle - manuel méthodologique. 3ème édition, Lavoisier, SSHA, pp 463-470.

I

- **Iboukhouléf H. 2014,** Traitement des margines des huileries d'olive par les procédés d'oxydation avancée basés sur le système Fenton- Like (H₂O₂/Cu). Thèse de doctorat : Chimie des matériaux. Université de Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou.
- **Isabelle Escartin, 11/2011.** Guide des agrumes.

J

- **Jacquemond C., Agostini D. et Cur K., 2009** - Des agrumes pour l'Algérie, Bureau d'ingénierie en horticulture et agro-industrie, p 4.
- **Janatis. S.f.; Be h eshtih. R.; Feizy .J, Fahimn. k. 2012.** chemical composition of lemon (citrusle mon) and peelits considered as animal food. Journal of food gida, 5: 267-271.
- **Jolliffe, I-T., Cadima, J., (2016).** Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 374(2065). DOI:10.1098/rsta.2015.0202.
- **JORA, (1998).** Arête du 27/05/1998 de journal officiel de la république algérienne N°35. Relatif aux spécifications microbiologiques de certaines denrées alimentaires. L'industrie agroalimentaire Algérie, pp 29.

K

- **Kamazawa S, Tanguchi M., Suzuki Y., Shimra M., Kwon M-S et Nakayama T. 2002.** Antioxidant activity of polyphenols in carob pods. Journal of Agricultural and Food Chemistry. P : 50, 373 – 377.
- **Kassambara, A., (2017).** Practical guide to principal component methods: R: PCA, M (CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra. 1 éd. STHDA, 169p. ISBN: 9781975721138
- **Koocheki, A, Ghandi, A, Razavi, S.M.A, Mortazavi, S.A, Vasiljevic, T. (2009),** The Rheological Properties of Ketchup as a Function of Different Hydrocolloids and Temperature. International Journal of Food Science and Technology. p : 44, 596–602.

L

- **Leyrel G., Vierling E. (2008)** Aliment et boisson, technologie et aspect réglementaire. Biosciences et technique, 3ème édition.
- **Loussert, R. (1989).** les agrumes.2. paris : production Edition Lavoisier. 157 p.
- **Linder R. 2005,** Les plans d'expériences un outil indispensable à l'expérimentateur. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris.

M

- **Mehallal. R. 2013,** Etude de la stabilité des caractéristiques physico-chimiques des composés à base de conserve de tomate et additifs alimentaires des composés à l'aire et à la température ambiante, Master de l'Université 08 Mai 1945.
- **Michaud Lili, 2018,** la tomate de la terre à la table. ISBN 9782897730826. P 1-20.
- **Ministre de l'agriculture et de développement rural, 2012.**

- **Manish K., Mahesh Ar, Msomashekh Ar. 2013.** evaluation of antitubercular activity of methanolic extract of *citrus sinensis*: 18-22.
- **Manthey, J.a., Guthrie, N., et Grohmann, K. (2001).** biological properties of citrus flavonoids pertaining to cancer and inflammation. *current medicinal chemistry*, 8, 135-153.
- **M'hiri Nouha, 25/11/2015.** Étude comparative de l'effet des méthodes d'extraction sur les phénols et l'activité antioxydante des extraits des écorces de l'orange «Maltaise demi sanguine » et exploration de l'effet inhibiteur de la corrosion de l'acier au carbone. Thèse de doctorat. Université de Lorraine. P : 143.
- **Mourad. (2003)** La production d'eau minérale en Algérie en hausse. www.algeriedz.com.
- **Mtcthg. 2009,** Magazine trimestriel du centre technique horticole de Gembloux- N° 27. Juin 2009.

N

- **Nathalie Raynau, 2007-2008.** Saveur du monde.
- **Nout R., Honnhonigan J-D., Boekel T-V. (2003).** Les aliments : Transformation, conservation et qualité. Ed. CTA, Germany. PP 37 -42, 134-261, 109-119.

O

- **Oboh. A, ademosun O. 2012.** characterization of the antioxidant properties of phenolic extracts from some citrus p : 729–736.
- **OkwnD. E, Emenik, I. n. 2006.** evaluation of phyto nutrients and vitamins contents of citrus fruits. *International journal of molecular medecine and advance science* 1: 1-6.

P

- **Pagès, J., Lê, S., Husson, F., (2006).** Approche statistique de la performance en analyse sensorielle descriptive. *Sciences Des Aliments*, 26 :446-469. DOI:10.3166/sda.26.446- 469.
- **Perinel E. et Pages J. (2004).** Optimal nested cross-over design in sensory analysis, *Food Quality and Preference*, vol.15, n°5, p. 439-446.
- **Praloran, 1971:** Les agrumes, techniques agricoles et production tropicales. Ed
- **Maisonneuve et Larox, Paris, T.XXI et XXII, 665p.**
- **Polese, Jeau- Marie. 2007,** la culture des tomates. P18-50.

R

- **Ramful, D.; Tarnus, E.; Aruoma, O.; Bourdon, E et Bahorun, T. (2011).** Poly phénol composition, vitamin c content and antioxydant capacity of mauritian citrus fruit pulp. *Food research international*, 44: 2088-2099.
- **Rymond Dextreit, 1998.** Les cinq merveilles naturelles éd : vivre en Harmonie.

S

- **Sanchez-Moreno C. (2002).** Methods Used to Evaluate the Free Radical Scavenging Activity in Foods and Biological Systems. *Food Science and Technology International*. P : 8.
- **Sauvageot. (1982).** Techniques d'analyses et de contrôle dans les industries agroalimentaires vol 2 : principes des techniques d'analyses. Technique et documentation, Lavoisier, Paris.
- **Sadok. D, Zedak. S. 2016,** Etude de la qualité physico-chimique et microbiologique de la conserve du concentré de tomate (TELLOISE), Master de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- **Singleton V., Orthofer R et Lamuela-Raventos R. 1999.** Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxydants by means of folin-ciocalteau reagent. *Methode of enzymologie*. P : 299, 152- 178.
- **Shankar Naika, Joep van Lidt de Jeude, Marja de Goffau, Martin Hilmi, Barbara van Dam, 1989** La culture des tomates, production, transformation et commercialisation. Première édition : 1989 Cinquièmes éditions révisées en 2005.
- **Slimestad, R., Fossen, T., and Verheul, M. J. (2008)** The flavonoids of tomatoes, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. P 56, 2436-2441.
- **Sophie Annibal, Pierre Vaysse, Vincent Mathieu, Brigitte Navez - Sébastien Lurol, 2016.** Le point sur : les outils de mesure de la qualité sur les fruits et légumes. P : 2-3.

T

- **Thomas DESMIER, 29 Mars 2016,** Les antioxydants de nos jours, définition et application.
- **Ting S. V. (1980)** Nutrients and Nutrition of Citrus fruits. In *Citrus Nutrition and Quality*, pp. 10 [S Naguy and JA Attaway, editors]. Houston, Texas: ACS Symposium series.

- **Traquato, L. D., Pachiega, R., Crespi, M. S., Nespeca, M. G., de Oliveira, J. E., & MAINTINGUER, S. I.** Potential of biohydrogen production from effluents of citrus processing industry using anaerobic bacteria from sewage sludge. *Waste management*, (2017); 59, 181-193.
- **Travers I. (2004).** Influence des conditions pédoclimatiques du terroir sur le comportement du pommier et la composition des pommes à cidre dans le Pays d'Auge. Thèse de Doctorat. Université de Caen. Basse-Normandie. PP124.
- **Tripoli, E.; Guardian, M.; Gimmanco, S.; Dimajo, D. et Gimmanco, M. (2007).** citrus flavonoids : molecular structure, biological activity and nutritional properties. *food chemistry*, 104: 466-479.

U

- **USDA/CNPP.** (2007) USDA national Nutrient database for standard reference <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/Data/SR16/reports/sr16fg11.pdf>, U.S. agricultural research service.
- **USDA (United States Department of Agriculture). 2014.** Citrus: World Markets and Trade.

V

- **Vasseneix, C., et al (2003).** "Enophtalmie endogène unilatérale à *Pseudomonas aeruginosa* chez un prématuré: à propos d'un cas." *Journal Français d'Ophtalmologie* 33.8 (2010): 556-560.
- **Vierling E. (2008)** .Science des aliments, 3e édition .Ed .Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine .Bordeaux .PP 236-237.
- **Virbel-Alonso C, 2011-** Citron et autres agrumes. Ed. Groupe Eyrolles, 15 p.

W

- **Walter. T, 2010,** Plans d'expériences : constructions et analyse statistiques. Mathématiques et Applications, Vol. 67, Springer, p532.
- **Welty. N, C. radovich, T. Meulia van der Knaap. E. 2007.** Inflorescence development in two tomato species. P 111-117.
- **Whistle R w .a. (1997).** Samoan herbal medicine, Isle botanical. Honolulu.

Y

- **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 Ahmed Draia Adrar.

SITE WEB

- www.snv.jussieu.fr.
- <http://tomatosphere.parlonssciences.ca/Ressources/bibliotheque/ArticleId/4663/taxonomie-de-la-tomate.aspx>.
- www.aujardin.info.

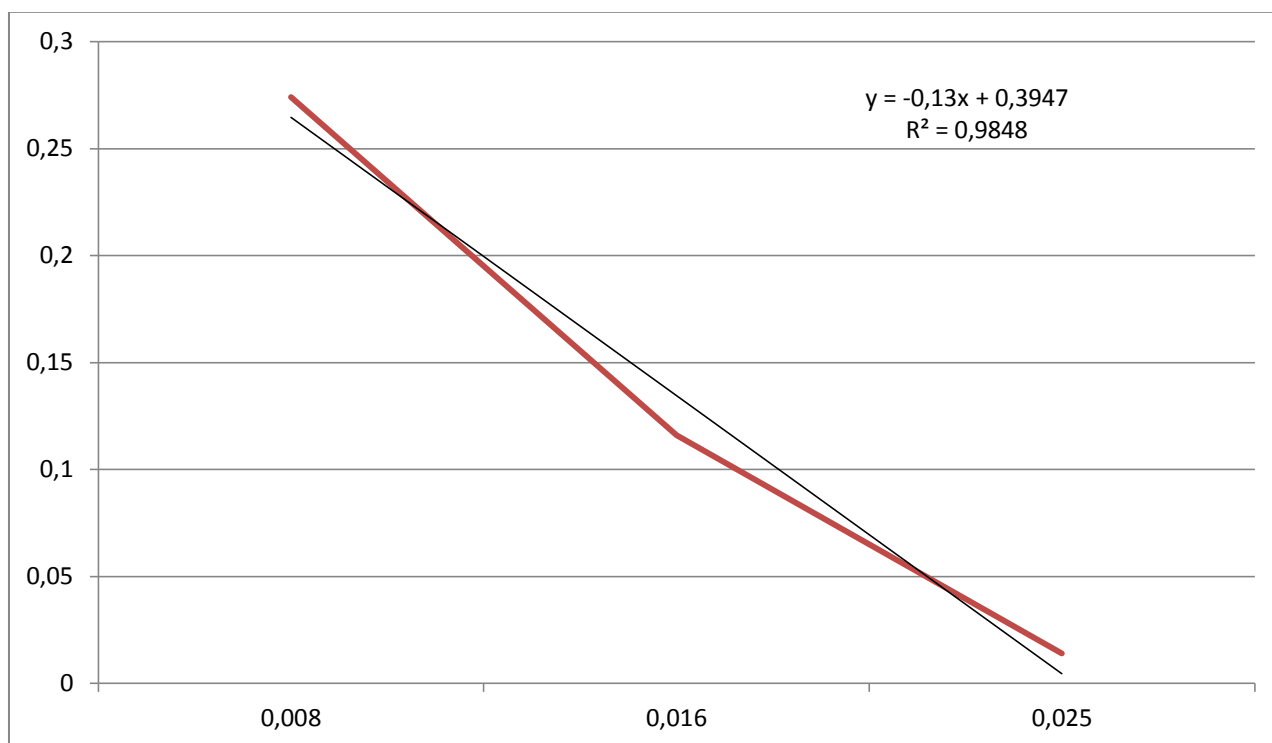
Annexes



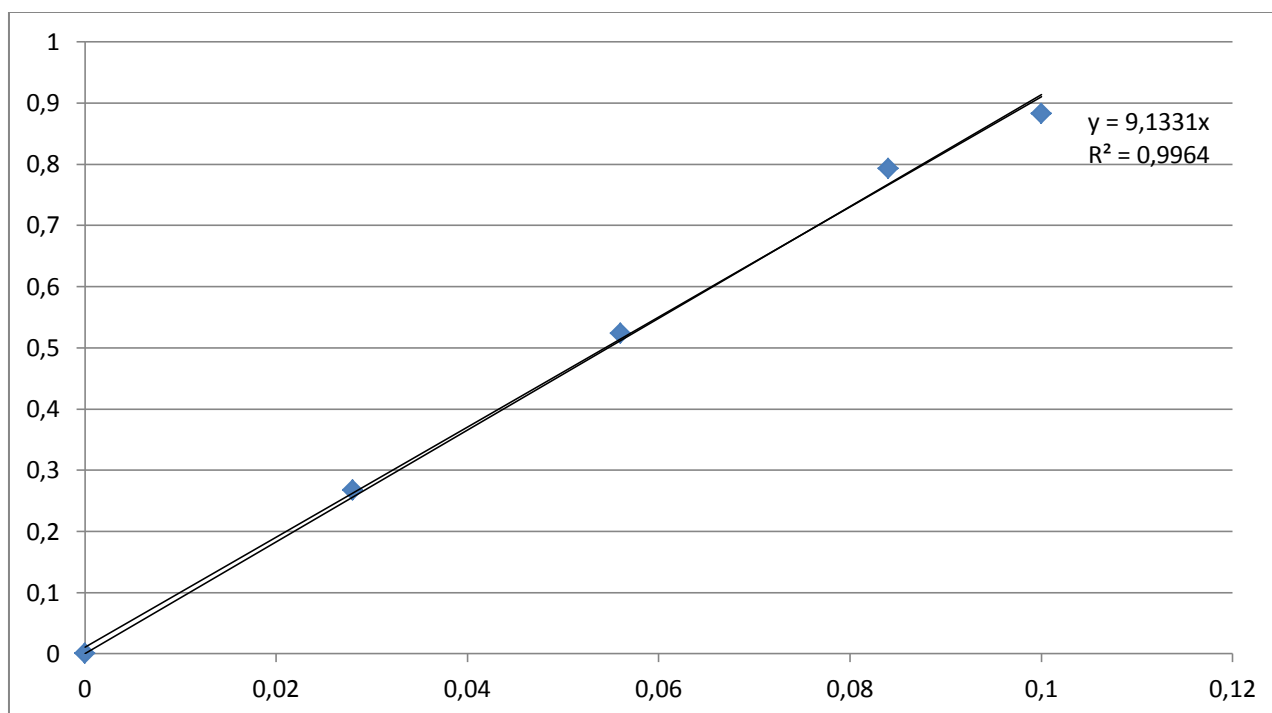
ANNEXE 01

COURBES D'ÉTALONNAGE

1- Courbe d'étalonnage d'acide ascorbique :



2- Courbe d'étalonnage d'acide gallique :



ANNEXE 02

FICHE DE DÉGUSTATION

QUESTIONNAIRE D'ANALYSE SENSORIELLE D'UN JUS DE FRUITS À BASE DE TOMATE ET DE CITRON

Nom : Prénom : Age

Masculin/féminin :

Date ://..... Heure :h min

(07) échantillons de jus de fruits formulées codé BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6 et BT7 sont présentées. Lisez attentivement les instructions, effectuez les évaluations dans l'ordre demandé, prenez votre temps pour apprécier les attributs énumérés. Prenez à chaque fois une quantité suffisante et consistante de chacune des boissons présentées, rincez la bouche à l'eau avant d'évaluer chaque attribut.

Il vous est demandé d'évaluer différentes caractéristiques et attribuer une appréciation selon les codes donnés pour chaque caractère.

Remarque

Les boissons sont préparées dans des conditions bien stériles (dans le cadre d'hygiène alimentaire) les boissons sont pasteurisées et conservées à 4 C° dans un réfrigérateur.

Le matériel nécessaire pour la dégustation est bien propre et stérile.

A- La couleur :

- 1- Rose
- 2- Rouge claire
- 3- Rouge moyen
- 4- Rouge foncé
- 5- Rouge vif



BT1 BT2 BT3 BT4 BT5 BT6 BT7

B- L'odeur :

- 1- Absente
- 2- Faible
- 3- Moyen
- 4- Forte
- 5- Très forte



BT1 BT2 BT3 BT4 BT5 BT6 BT7

C- Le goût :

➤ **Goût sucré :**

- 1- Pas de tout sucré
- 2- Faiblement sucré
- 3- Sucré
- 4- Fortement sucré
- 5- Très fortement sucré



BT1 BT2 BT3 BT4 BT5 BT6 BT7

➤ **Goût acide :**

- 1- Pas de tout acide
- 2- Faiblement acide
- 3- Moyennement acide
- 4- Fortement acide
- 5- Très fortement acide



BT1

BT2

BT3

BT4

BT5

BT6

BT7

➤ **Arrière –goût :**

- 1- Absent
- 2- Faible
- 3- Moyen
- 4- Fort
- 5- Très fort



BT1

BT2

BT3

BT4

BT5

BT6

BT7

D- L'arôme :

- 1- Absent
- 2- Faible
- 3- Moyen
- 4- Fort
- 5- Très fort



BT1

BT2

BT3

BT4

BT5

BT6

BT7

E- La texture en bouche :

- 1- Lisse
- 2- Faiblement granuleuse
- 3- Moyennement granuleuse
- 4- Fortement granuleuse
- 5- Très fortement granuleuse



BT1

BT2

BT3

BT4

BT5

BT6

BT7

F- Attribuer une note de 1 à 9 pour chaque échantillon selon votre préférence sachant que 1 correspond au moins préféré et le 9 au plus préféré comme présenté dans l'échelle ci-dessous :

- 1- Extrêmement désagréable
- 2- Très désagréable
- 3- Moyennement désagréable
- 4- Assez désagréable
- 5- Ni agréable ni désagréable
- 6- Désagréable
- 7- Agréable
- 8- Très agréable
- 9- Extrêmement agréable



BT1

BT2

BT3

BT4

BT5

BT6

BT7

G- Quelles sont les caractéristiques qui ont motivées votre préférence :

1- La couleur

2- L'odeur

3- Le goût sucré

4- Le goût acide

5- La texture

Autres

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

MERCI BEAUCOUP POUR VOTRE COOPÉRATION

Résumé

Au terme de cette étude expérimentale, nous avons testé la possibilité de fabriquer une nouvelle boisson de type jus à base de jus de tomate additionné d'un jus de citron présentant des qualités organoleptiques et nutritionnelles satisfaisantes. La boisson est composée d'ingrédients divers à savoir le jus de tomate, le jus de citron, le saccharose et le sel, cette composition confère à ce produit une valeur nutritionnelle intéressante. Le barème de pasteurisation utilisé est efficace, mais l'utilisation du conservateur et du froid est nécessaire pour préserver la qualité de la boisson. En ce qui concerne les analyses effectuées, les résultats sont satisfaisants, parmi les 9 boissons formulées, trois boissons sont appréciées. Cette étude mérite d'être approfondie et permet sans doute de bonnes perspectives d'élaborer une nouvelle boisson de type jus à base de jus de tomate. Une étude plus approfondie tenant compte de tous les paramètres et les facteurs pouvant contribuer à la conservation des qualités organoleptiques, hygiéniques et nutritionnelles, mais cela n'est possible qu'en respectant les principes d'hygiène et des bonnes pratiques de fabrication, notamment la qualité microbiologique des matières premières et les conservateurs utilisés ainsi que l'optimisation des traitements thermiques efficaces.

Abstrat:

At the end of this experimental study, we tested the possibility of making a new juice-type drink based on tomato juice with added lemon juice with satisfactory organoleptic and nutritional qualities. The drink is composed of various ingredients, namely tomato juice, lemon juice, sucrose and salt, which gives this product an interesting nutritional value. The pasteurization system used is effective, but the use of preservatives and cold is necessary to preserve the quality of the drink. The results of the analyses carried out are satisfactory, among the 9 drinks formulated, three drinks are appreciated. This study deserves to be deepened and undoubtedly offers good prospects for the development of a new juice-type drink based on tomato juice. A more in-depth study taking into account all the parameters and factors that can contribute to the preservation of the organoleptic, hygienic and nutritional qualities, but this is only possible by respecting the principles of hygiene and good manufacturing practices, in particular the microbiological quality of the raw materials and the preservatives used, as well as the optimization of effective heat treatments.