



République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة زيان عاشور-الجلفة
Université Ziane Achour – Djelfa
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
قسم العلوم الفلاحية والبيطرية
Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité : Agroalimentaire et Contrôle de Qualité

Thème

Valorisation des déchets de café dans différents domaines

Présenté par : Kessoum Amira et Lougliti Randa Amina

Devant le jury composé de :

Président : Mr MORTET A.	Maitre-assistant (B)	UNIV-DJELFA
Promoteur : Mr BAKHTI M.	Maitre-assistant (A)	UNIV-DJELFA
Examineur : Mme CHENOUF A.	Maitre-assistant (A)	UNIV-DJELFA
Examineur : Mr REBHI A.	Maitre de Conférences (B)	UNIV-DJELFA

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

On loue Dieu de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr BAKHTI M.** Nous tenons à vous écrire un « Merci » sincère pour la qualité de votre encadrement exceptionnel, votre soutien, votre enseignement, votre patience, vos conseils et votre disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont aux membres de jury le président du jury monsieur **MORTET.A** et les examinateurs Mme **CHENOUF. A** et monsieur **M. REBHI. A** pour avoir accepté de juger notre présent travail.*

Et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation, Nous vous remercions d'avoir enrichi nos connaissances et de nous avoir guidées durant toutes ces années.

Amira et Randa

Dédicaces

Cher Dieu je veux commencer par vous remercier pour tout ce que j'ai et tout ce que tu m'as donné, Pour tous tes plans que je sais qu'ils sont mieux pour moi.

Ce modeste travail de fin d'étude est dédié :

- En premier lieu, Aux trois femmes les plus importantes de ma vie :

- A ma mère qui m'a aidé à atteindre ce que je suis et qui a cru en moi avant que je ne croie en moi.*
- A ma deuxième mère qui m'a élevée aimée et soutenu*
- A ma grand-mère que Dieu la donne une longue et joyeuse vie*

- A mon deuxième père Dieu que Dieu ait son âme

- A mes chers frères et sœurs qui m'ont toujours soutenu

- A ma très chère cousine et ma meilleur amie d'être toujours la

- A toutes mes amies

- A mon cher binôme pour son entente et sa sympathie

- A toute ma famille

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

Amira.

Dédicaces

Grace à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tien très chaleureusement à le dédier à :

Ma mère chérie et mon père qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études et pour leurs patience que Dieu les protègent et les garde pour moi.

A mes adorables sœurs. Et à mes très chères amies et camarades pour tous les moments d'échange et de débat, aux personnes qui m'ont toujours aidé et soutenue sans oublier mes cousines.

Randa.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....01

Chapitre I : Valorisation dans le domaine de l'IAA

I. 1.Introduction	03
I.2.Définitions.....	04
I.3.Caractéristiques des rejets des IAA.....	05
I.4.Classification des différents types de déchets alimentaires.....	05
1. Comestibilité.....	05
2. État.....	06
3. Origine.....	06
4. Complexité	06
5. Présence de produit animal.....	07
6. Traitement.....	07
7. Emballage	07
8. Biodégradabilité des emballages.....	07
9. Étape de la chaîne d'approvisionnement.....	07
I.5 Impacts des déchets alimentaires.....	10
I.6 Différentes conversions des déchets de l'IAA.....	10
I.6.1 Conversion thermique.....	10
I.6.2 Conversion chimique.....	11
I.6.3 Conversion biologique.....	11
I.7 Valorisation des sous-produits et des déchets de l'IAA.....	11
I.7.1. Sous-produits et les déchets des fruits et des légumes	11
I.7.1.1. Sous-produits des fruits.....	12

I.7.1.2 Sous-produits et les déchets d'origine animale.....	14
I.8 Déchets industriels de transformation de viande et de volaille.....	14
I.9 Déchets industriels de transformation des produits de la mer.....	14
I.10 Biomolécules issues de biodéchets d'origine végétale	15
I.10.1 Pectines.....	15
I.10.2 Huiles essentielles.....	15
I.10.3 Antioxydants.....	16
I.10.4 Molécules nutraceutiques.....	16
I.10.5 Phénoliques.....	16
I.10.6 Acide citrique.....	16
I.10.7 Acide lactique.....	17
I.11 Enzymes.....	17
I.12 Fibres alimentaires.....	17
I.13 Production de biocarburants et de bioénergie.....	20
I.14 Domaines de valorisation des déchets et sous produits de l'industrie agroalimentaire.....	20
I.15 Avantages et inconvénients.....	22
I.16 Exemple type de valorisation dans l'IAA.....	25
I.17 Conclusion.....	28
Références bibliographiques.....	28

Chapitre II : Aperçu sur le caféier et le café

II.1. Introduction.....	32
II.2. Historique.....	33
II.3. Classification botanique des caféiers	34
II.4. Répartition géographique des caféiers.....	35
II.5. Production et consommation du café	36
II.6. Description morphologique des caféiers	38
II.7. Différences entre C. arabica et C. canephora.....	40
II. 7.1. Coffea arabica (70% de la production mondiale)	40
II. 7.2. Coffea canephora (30% de la production mondiale)	41
II. 8. Le café vert : le fruit.....	41

II. 8.1. Histologie de la fève de café vert.....	41
II. 8. 1.1. Le mésocarpe externe.....	42
II. 8. 1.2. Le mésocarpe interne.....	42
II. 8. 1.3. L'endocarpe.....	43
II. 9. Composition chimique du café vert.....	43
II. 9.1. Les Acides chlorogéniques (ACG)	44
II. 9.2. La caféine (triméthyl-1, 3,7 xanthine)	44
II. 9.3. Les glucides.....	45
II. 9.4. La trigonelline.....	45
II. 9.5. Les lipides.....	46
II.10. La torréfaction.....	46
II.11. Déchets issus de la récolte et de la consommation du café	46
II.11. 1. Pulpe de café.....	48
II.11. 2. Cerise de café.....	48
II.11. 3. Pellicule argentée.....	48
II.11. 4. Marc de café.....	48
II. 12. Avantages et inconvénients du café.....	49
II.13. Conclusion.....	52
II.13. Références bibliographiques.....	53

Chapitre III : Valorisation du marc de café

III. 1. Introduction.....	55
III.2.Traitement du café.....	56
III.03. Présentation du marc de café (MC)	59
III.03.1.Propriétés du marc de café.....	60
III.03.1.1.Propriétés physiques du marc de café.....	60
III.03.1.2.Propriétés chimiques du marc de café.....	61
III.04. Les composés bioactifs de Marc de café.....	64
III.04.1.La caféine.....	64
III.04.2.La trigonelline.....	64
III.04.3.Acides chlorogéniques.....	65

III.05.Écotoxicité	65
III.06. Domaines de valorisation du marc de café.....	66
III.06.1. Santé et alimentation.....	66
III.06.1.1.Santé.....	66
III.06.1.2. Alimentation Humaine et Industrie Alimentaire.....	68
III.06.1.3.Alimentation animale.....	70
III.06.2. Agriculture.....	70
III.06.2.1. Production de compost et d’engrais.....	71
III.06.2.2. Substrat pour la culture de micro-organismes et de champignons comestibles.....	72
III.06.3. Matériaux.....	74
III.06.3.1. Biopolymère et biocomposite.....	74
III.06.3.2. Caroténoïdes.....	74
III.06.4. Matériau de construction.....	75
III.06.4.1. Matériau de remplissage de fondation.....	75
III.06.4.2. Utilisation comme remblai pour les abords des routes.....	76
III.06.5. Environnement.....	76
III.06.5. 1.Bioadsorbant.....	76
III.06.5. 2. Impacts environnementaux de la récupération du marc de café et de sa mise en valeur.....	78
III.06.6. Production d’énergie et de bicarburnats.....	79
III.06.6.1.Combustion directe et combustibles solides.....	79
III.06.6.2.Combustible pour les fours industriels.....	80
III.06.6.3.Granules de combustion pour les fours résidentiels.....	80
III.06.6.4.Production de biogaz ou en gaz de synthèse.....	81
III.06.6.5.Biogaz.....	82
III.06.6.6.Production de biodiesel.....	82
III.06.6.7.Catalyse basique et acide.....	83
III.06.6.8.Catalyse lipasique.....	83
III.06.6.9.Production de biodiesel assistée par ultrasons.....	83
III.06.6.10.Préparation in-situ de biodiesel à partir de marc de café épuisé.....	83
III.06.6.11.Diesel renouvelable.....	83
III.06.6.12.Bioéthanol et bioéthers.....	84

III.06.6.13.bio-huile.....	85
III.06.6.14.Extraction de l'huile du marc de café épuisé.....	85
III.06.7. Divers.....	85
III.07.Conclusion.....	88
Références bibliographiques.....	89
Conclusion Générale.....	93
Résumé en arabe (ملخص)	
Résumé en français	
Résumé en anglais (Abstract).	

Liste des Tableaux

Chapitre I : Valorisation dans le domaine de l'IAA

Tableau.I.01 : Exemples de Biomolécules extraites des bio-déchets	19
Tableau.I.02. a : Avantages et limites des différents types de valorisation : Agriculture	22
Tableau.I.02. b : Avantages et limites des différents types de valorisation : Energétique.....	22
Tableau.I.02. c : Avantages et limites des différents types de valorisation : Animale.....	23
Tableau.I.02. d : Avantages et limites des différents types de valorisation : nutrition humaine et animale.....	23
Tableau.I.02. e : Avantages et limites des différents types de valorisation : Aliment santé - fonctionnel	24
Tableau.I.02. f : Avantages et limites des différents types de valorisation : Nutraceutique –cosmécéutique	24

Chapitre II : Aperçu sur le caféier et le café

Tableau .II.01 : Importations et exportations de café dans le monde en 2020-2021.....	37
Tableau II.02 : Composition chimique des graines du café vert Robusta et Arabica.....	43
Tableau II.03 : Composition chimique des sous-produits du café brut et transformé.....	47
Tableau II.04 : Principaux effets physiologiques de la caféine	49

Chapitre III : Valorisation du marc de café

Tableau III.01 : Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité	60
Tableau III.02 : Pouvoir calorifique de divers résidus de biomasse.....	61
Tableau III.03 : Composition élémentaire du marc de café	62
Tableau III.04 : Principaux composés du marc de café	62
Tableau III.05 : Composition des principaux minéraux du marc de café	63
Tableau III.06 : Résultats de diverses études sur les propriétés adsorbantes du MC.....	78
Tableau III.07 : Valeur calorifique du marc de café et autres résidus de biomasse.....	79
Tableau III.08 : Émissions de gaz et de particules selon le combustible.....	81

Liste des figures

Chapitre I : Valorisation dans le domaine de l'IAA

Figure I. 01 : Indicateurs pour catégoriser les déchets alimentaires	9
Figure I .02: Types de valorisation des résidus et déchets de L'IAA.....	21
Figure I .03: La « bioraffinerie d'oliviers » avec les processus OMW «margine » associés, la valorisation et l'élimination des sous-produits et des déchets	26

Chapitre II : Aperçu sur le caféier et le café

Figure II.01 : Organigramme de la taxonomie du genre Coffea	34
Figure II.02 : Répartition géographique de la culture du café	36
Figure II.03 : Distribution géographique de la production et de la consommation mondiale du café	37
Figure II.04 : Feuilles de différentes espèces de caféiers	39
Figure II.05 : Fleurs de différentes espèces de caféiers	39
Figure II.06 : Fruits de caféiers illustrant la diversité de forme et de couleur du péricarpe	40
Figure II. 07 : Structure du fruit et de la graine du caféier	42
Figure II.08 : Structure chimique de l'acide chlorogénique	44
Figure II.09 : Molécule de la caféine	45
Figure II.10 : Molécule de la trigonelline	46
Figure II.11 : Sous-produits du café obtenus lors de la transformation du café	47
Figure II.12 : Impact de la consommation de café sur la santé humaine	50

Chapitre III : Valorisation du marc de café

Figure III.01 : Étapes de traitement du processus à sec	57
Figure III.02 : Étapes de traitement « Voie humide » et « Voie semi-humide »	58
Figure III.03 : Photos du marc de café humide (a) et du marc de café séché (b)	59
Figure III.04 : Production de bioéthanol, biodiesel, bio-huile, biocharbon, diesel renouvelable et biogaz du MC.....	87

Liste des Abréviations

Abréviation	Désignation
AC	Acide citrique
ACG :	Acides chlorogéniques
AL	Acide lactique
AVC :	Accident vasculaire cérébral
BCAA	Acide aminé à chaîne latérale ramifiée
BCAA :	Acide aminé à chaîne latérale ramifiée
CAM :	Capacité d'adsorption maximale
CPT :	Composés phénoliques totaux
DA :	Déchet alimentaire
DBO5 :	Demande biochimique en oxygène
DCO :	Demande chimiques en oxygène
EGAM :	Ester méthylique d'acide gras
ESF :	Etat solide de fermentation
K :	Potassium
MC :	Marc de café
MC :	Marc de café
MMT :	Million de tonnes métriques
MO :	Matière organique
MS:	Masse solide
N :	Azote
NCRH :	Bicarbonate de sodiumballe de riz traitée
OMW :	Déchet liquide d'olive
P :	Phosphore
PQGMR :	Plan directeur de gestion des matières résiduelles
SP :	Sous produit
TTC :	Teneur totale en caroténoïdes
UV:	Ultra violet
VAM :	Volume d'adsorption maximum



Introduction Générale

Introduction Générale

Les différentes activités de l'industrie agroalimentaire sont génératrices d'énormes quantités de sous-produits et de déchets ; ces derniers ont un impact au niveau environnemental, social et économique (**GIROTTO *et al.*, 2015**).

Le développement de solutions durables pour la gestion des déchets alimentaires représente l'un des principaux défis de société. Ces solutions doivent être capables d'exploiter les précieuses ressources représentées par les déchets alimentaires pour atteindre des objectifs ayant des avantages sociaux, économiques et environnementaux ***Idem***.

Il existe plusieurs méthodes conventionnelles de gestion des déchets alimentaires ; cependant, la méthode la plus couramment utilisée dans le monde est la mise en décharge, qui est non bénéfique, très nocif pour l'environnement et présente un risque pour la santé humaine (**UNUOFIN *et al.*, 2021**).

Les solutions au problème des déchets alimentaires sont la prévention pendant la production et sa valorisation. La valorisation est une technique durable qui transforme les déchets alimentaires en produits à valeur ajoutée, et qui limite l'élimination des déchets alimentaires dans les décharges et les émissions de gaz à effet de serre (**O'CONNOR *et al.*, 2021**).

Le café est l'une des boissons les plus consommées au monde et est le deuxième produit le plus échangé après le pétrole. En raison de forte demande de ce produit, de grandes quantités de résidus sont générées, qui sont toxiques et représentent de graves problèmes environnementaux. Le déchet du marc de café est le principal résidu du café, obtenu lors de la préparation du café. Récemment, des tentatives ont été faites pour utiliser ce résidu pour la production d'énergie ou de composés à valeur ajoutée, comme stratégies pour réduire son niveau de toxicité, tout en lui ajoutant de la valeur. (**MUSSATTO *et al.*, 2011**).

D'après le conseil international du café, L'Algérie a consommé en moyenne 2 131 milliers de sac de 60kg de café au cours de l'année 20/21, avec une augmentation de 3.7% pendant la période (2017/18-2020/21) (**ICO, 2021**).

L'objectif de ce travail est de présenter une synthèse bibliographique sommaire sur les voies de valorisation des déchets et sous-produits de l'industrie agroalimentaire en générale et

tout particulièrement le marc de café ; et ceci dans le contexte de la protection de l'environnement et du délogement durable.

Ce Mémoire est bâti autour de trois volets :

- Le premier volet qui forme le premier chapitre est un inventaire bibliographique non exhaustif et incomplet des différents domaines de valorisation des résidus de l'industrie agroalimentaire en générale.
- Le deuxième volet qui constitue le deuxième chapitre est une synthèse bibliographique du café répartie en deux sections :
 - ✓ La première section porte sur une synthèse bibliographique abrégée bref où le fruit du café est décrit du point de vue botanique et végétale,
 - ✓ La seconde partie s'articule autour de la composition biochimique des deux variétés du café les plus utilisées ; ainsi que les sous produits et les déchets engendrés suite à la production et de la transformation du café.
- Le troisième volet qui compose le troisième chapitre porte sur une synthèse bibliographique abrégée bref sur les propriétés et la compositions chimique du marc de café et les molécules bioactives qui le caractérise, ainsi que les études réalisées sur les applications potentielle de ce déchet.

Une conclusion générale termine ce travail et est suivi de recommandations.

An orange border with rounded corners and small circular tabs at the top and bottom corners, resembling a scroll or a frame.

***Chapitre I : Valorisation dans
le Domaine de L'IAA***

I. 1.Introduction

Divers procédés de l'industrie alimentaire (transformation, conditionnement, transport et stockage) dans leur forme actuelle sont très inefficaces compte tenu du volume de déchets qu'ils génèrent au cours de leurs différentes étapes. Ces déchets sont principalement de nature organique et caractérisés par une demande biologique en oxygène (DBO) et chimique en oxygène (DCO) élevée et des variations de composition et de pH dues aux variations saisonnières et aux processus de manipulation. De tels déchets conduisent à une contamination bactérienne en raison de la forte teneur en eau et des taux d'accumulation élevés, sans parler des problèmes de gestion de l'élimination et du coût qui y est associé (**RAVINDRAN et JAISWAL, 2016 ; PFALTZGRAFF *et al.* 2013**).

À l'échelle mondiale, les sous-produits de l'industrie alimentaire représentent une source critique de pollution : les pertes et les déchets alimentaires se produisent tout au long de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, représentant environ 1,3 milliard de tonnes par an, soit 16 % de l'approvisionnement alimentaire total (**MARCILLO-PARRA *et al.*, 2021; FAO, 2019**).

La valorisation des déchets alimentaires offre une opportunité économique et environnementale, qui peut réduire les problèmes de leur élimination conventionnelle. Les déchets alimentaires sont généralement éliminés dans des décharges ou incinérés, ce qui entraîne de nombreux problèmes environnementaux, sociaux et économiques. De grandes quantités de déchets alimentaires sont produites dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire de l'agriculture : production, post-récolte, distribution (transport), transformation et consommation. Les déchets alimentaires peuvent être valorisés en une gamme de produits, notamment des biofertilisants, des bioplastiques, des biocarburants, des produits chimiques et des nutraceutiques (**O'CONNOR *et al.*, 2021**).

L'objectif à travers ce chapitre est d'effectuer une synthèse bibliographique simplifiée sur les déchets et sous-produits engendrés par l'industrie et les activités agroalimentaires, ainsi que leurs valorisation potentielles dans différents secteurs comme l'alimentaire, l'énergie, l'environnement....

Ce chapitre est scindé en deux parties :

- ✓ La première est consacrée aux différents types déchets et sous-produits générés par la filière agroalimentaire ;
- ✓ La deuxième partie traite des différentes voies de valorisation utilisées à travers le monde.

I.2. Définitions

- ❖ **Pollution** : est définie comme étant l'introduction dans le milieu aquatique de toute substance susceptible de modifier les caractéristiques physiques, chimiques et/ou biologiques de l'eau et de créer des risques pour la santé de l'homme, de nuire à la faune et à la flore terrestre et aquatique, de porter atteinte à l'agrément des sites ou de gêner toute autre utilisation normale des eaux (**JORADP , 2003**).
- ❖ **Pollution des eaux** : L'introduction dans le milieu aquatique de toute substance susceptible de modifier les caractéristiques physiques, chimiques et/ou biologiques de l'eau et de créer des risques pour la santé de l'homme, de nuire à la faune et à la flore terrestres et aquatiques, de porter atteinte à l'agrément des sites ou de gêner toute autre utilisation normale des eaux (**JORA, 2003**).
- ❖ **Développement durable** : Un concept qui vise la conciliation entre le développement socio-économique permanent et la protection de l'environnement, c'est-à-dire l'intégration de la dimension environnementale dans un développement qui vise à satisfaire les besoins des générations présentes et futures (**JORA, 2003**).
- ❖ **Déchet** : toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire (**GRIGORAS, 2012**).
- ❖ **Bio-déchets** : les déchets biodégradables de jardin ou de parc, les déchets alimentaires ou de cuisine issus des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que les déchets comparables provenant des usines de transformation de denrées alimentaires.
- ❖ **Traitement** : toute opération de valorisation ou d'élimination, y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination.
- ❖ **Sous-produit** : Une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production dudit bien peut être considérée comme un sous-produit et non comme un déchet que si certaines conditions suivantes sont remplies :
 - ✚ L'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine et légale (environnement et santé) ;
 - ✚ Peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes ;
 - ✚ Et en faisant partie intégrante d'un processus de production.
- ❖ **Valorisation** : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin

particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie (GRIGORAS., 2012).

- ❖ **Recyclage** : toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage (GRIGORAS, 2012).

I.3. Caractéristiques des rejets des IAA

Les industries agroalimentaires (IAA) réalisent la transformation des productions agricoles et de la pêche pour l'alimentation humaine et animale. Une partie seulement de la matière première utilisée est conservée dans les produits. Le reste se retrouve sous forme de rejets, qui sont parfois valorisables, ou alors destinés à l'abandon. Ils se présentent sous forme solide (déchets, particules) ou bien dissous dans l'air ou dans les eaux (RENE MOLETTA, 2006).

D'après RENE MOLETTA (2006) les rejets liquides de l'activité agroalimentaire sont essentiellement caractérisés par leur charge importante en matières organiques, les paramètres qui permettent d'apprécier la qualité des effluents sont prioritairement les suivants :

- La matière chimique en oxygène (DCO)
- La demande biochimique en oxygène (DBO₅)
- Les matières oxydables (MO).

I.4. Classification des différents types de déchets alimentaires

Une classification systématique des différents types de déchets alimentaires a été proposée par GARCIA-GARCIA *et al* (2015) qui permet une sélection plus appropriée parmi les alternatives de gestion des déchets disponibles.

Cette classification c'est une conséquence de l'évaluation de neuf indicateurs ou caractéristiques. À chaque étape du processus de catégorisation, une caractéristique sur deux ou trois options doit être sélectionnée. Cette catégorisation proposée est illustrée dans la figure I.1 et les différents indicateurs sont mentionnés ci-dessous (GARCIA-GARCIA *et al.*, 2017).

1. Comestibilité

Le produit est comestible s'il est ou était censé être consommé par l'homme à tout moment au cours de son cycle de vie, sinon le produit est non comestible. Les produits non comestibles comprennent les peaux de fruits, les arêtes de viande, certaines tiges de légumes, etc. Lorsque le produit est comestible à partir d'un point de vue biologique, mais il n'y a pas de

demande pour cela (par exemple certains types d'abats) il est considéré comme non comestible dans ce schéma. Par conséquent, le caractère comestible de certains déchets alimentaires peut varier au cours du temps et de la zone géographique considérée (**GARCIA-GARCIA et al ., 2017**).

2. État

Cette caractéristique ne doit être appréciée que pour les produits comestibles. Le produit est mangeable s'il n'a pas perdu les propriétés requises pour être vendu et propre à la consommation humaine au moment de sa gestion en tant que déchet, sinon le produit est immangeable. Si l'aliment n'a pas perdu ces propriétés, mais nécessite un traitement supplémentaire dans l'usine avant d'être vendu ou consommé, il est classé comme mangeable et non transformé (voir indicateur 6). Un produit alimentaire peut devenir immangeable en étant endommagé à différents points de la chaîne d'approvisionnement (par exemple trop cuit lors de sa fabrication, renversé lors de sa distribution), s'être avarié (par exemple en sortant de la chaîne du froid), en dépassant sa date de péremption, etc. le produit contient à la fois des parties non comestibles et comestibles et il va être géré dans son ensemble, il doit être considéré comme non comestible. Lorsque le produit est comestible d'un point de vue biologique, il peut toujours y avoir des problèmes éthiques qui peuvent conduire à le classer comme non comestible pour restreindre son utilisation pour la consommation humaine. Une troisième catégorie comprend les produits non comestibles pour l'homme en raison de problèmes de sécurité, mais toujours aptes à l'alimentation animale (par exemple, tombés des bandes transporteuses pendant la fabrication). *Idem.*

3. Origine

Le produit est d'origine animale s'il a été élaboré par un animal (par exemple, produits laitiers, œufs, miel) ou à partir de parties d'animaux (viande, poisson compris), sinon le produit est d'origine végétale. Lorsque le produit contient à la fois des matières végétales et animales (par exemple des plats cuisinés), il doit être classé en fonction de son ingrédient prédominant. S'il s'agit d'un ingrédient végétal, le produit sera également classé comme produit mixte (voir étape de catégorisation suivante). *Idem.*

4. Complexité

Cette caractéristique n'est requise que pour les produits d'origine végétale. Le produit est unique s'il est formé d'un seul type d'ingrédient et qu'il n'a pas été en contact avec d'autres matières alimentaires, sinon le produit est mélangé. *Idem.*

5. Présence de produit animal

Lorsque le produit est d'origine animale, il doit être classé en viande (y compris le poisson), produit animal (un produit issu d'animaux) ou sous-produit d'organismes animaux non destiné à la consommation humaine (par exemple sous-produits d'abattoirs). Dans le dernier cas, les déchets doivent être encore classés conformément à la réglementation européenne en catégorie 1, 2 ou 3. Lorsque le produit est à base de plantes et mélangé, il doit être évalué si le produit contient des matières d'origine animale ou a été en contact avec des matières d'origine animale.*Idem.*

6. Traitement

Un aliment est considéré comme traité (transformé) lorsqu'il a les mêmes propriétés que le produit final à vendre au consommateur (c'est-à-dire qu'il a terminé le processus de fabrication, par exemple un plat cuisiné ; ou l'aliment n'a besoin d'aucun traitement avant d'être distribué, par exemple les fruits et légumes frais). Si l'aliment nécessitait encore un traitement au moment de sa gestion en tant que déchet, il n'est pas traité. Par conséquent, seuls les déchets comestibles et comestibles doivent être évalués à cette étape.*Idem.*

7. Emballage

Un produit est déballé s'il n'est contenu dans aucun matériau d'emballage. Si le produit est emballé mais qu'il existe une technologie disponible pour le déballage et la séparation des déchets alimentaires de son emballage, le produit peut être considéré comme non emballé ; sinon le produit est emballé.*Idem.*

8. Biodégradabilité des emballages

Cette caractéristique doit être évaluée pour les aliments emballés. Généralement, la biodégradabilité d'un matériau signifie qu'il peut être digéré par des micro-organismes, bien que le processus puisse durer plusieurs mois ou années. Par conséquent, l'emballage biodégradable fait référence à celui fait de matériaux qui ont été testés et ont reçu un certificat d'être « approprié à la digestion anaérobie » ou «composable». Les emballages biodégradables sont généralement composés de papier, de bioplastiques, de bois ou de tout produit d'origine végétale. Généralement, les emballages non biodégradables sont en plastique, en verre ou en métal. *Idem.*

9. Étape de la chaîne d'approvisionnement

Les déchets de restauration incluent les déchets ménagers et les déchets de la restauration (ex : restaurants, écoles, hôpitaux, etc.) ; les déchets autres que de restauration sont générés à des stades plus précoces de la chaîne d'approvisionnement (c'est-à-dire pendant l'agriculture, la fabrication, la distribution ou la vente au détail).

L'évaluation de ces neuf étapes, et la détermination conséquente de neuf caractéristiques, est le point de départ pour sélectionner l'alternative de gestion des déchets la plus pratique. *Idem.*

1	Comestibilité
	- comestible - non comestible
2	Etat
	- mangeable - immangeable - immangeable pour les humains, mangeable pour les animaux
3	Origine
	- d'origine animale - d'origine végétale
4	Complexité
	- produit unique - produit mélangé
5	Présence de produits animaux
	- Viande - produit animal - sous-produit animal (catégories 1-3)
	- en contact avec des produits animaux - pas en contact avec des produits animaux
6	Traitement
	- traité (transformé) - non traité (non transformé)
7	Emballage
	- emballé - non emballé / séparable de l'emballage
8	Biodégradabilité d'emballage
	- Emballage biodégradable - Emballage non biodégradable
9	Etape de la chaîne d'approvisionnement
	- déchets de restauration - déchets non alimentaires

Figure I.01. Indicateurs pour catégoriser les déchets alimentaires.
(GARCIA-GARCIA *et al.*, 2017)

I.5 Impacts des déchets alimentaires

Les déchets alimentaires sont un problème à la fois environnemental et socio-économique qui affecte la sécurité alimentaire des pauvres, la qualité et la sécurité alimentaire, l'environnement, l'économie et la société. Cela représente un gaspillage de ressources (comme l'énergie, la terre et l'eau) utilisées dans la production alimentaire (FAO, 2011).

D'un point de vue environnemental, SP et DA contribuent aux émissions de gaz à effet de serre (GES) lors de l'élimination finale dans les décharges (rejet incontrôlé de méthane) et lors des activités associées à la production, la transformation, la fabrication, le transport, le stockage et la distribution des aliments. D'autres impacts environnementaux associés à SP et DA sont l'épuisement des ressources naturelles en termes de sol, de nutriments, d'eau et d'énergie, la perturbation des cycles biogéniques due aux activités agricoles intensives et tous les autres impacts caractéristiques à n'importe quelle étape du CAA. Les impacts sociaux de SP et DA peuvent être attribués à une dimension éthique et morale dans le concept général de sécurité alimentaire mondiale. Les impacts économiques sont dus aux coûts liés au gaspillage alimentaire et à leurs effets sur les revenus des agriculteurs et des consommateurs (GIROTTO *et al.*, 2015).

I.6. Différentes conversions des déchets de l'IAA

Il existe dans la littérature et dans la pratique industrielle ; plusieurs techniques pour transformer la biomasse végétale et animale en énergie et en produits : nous pouvons citer la conversion thermique, chimique et biologique (KOÇ, 2017) :

I.6.1. Conversion thermique

La conversion thermique de sous-produits alimentaires ou de déchets, en particulier sous forme solide, repose sur la production de carburant et de produits chimiques qui sont généralement utilisés pour faire fonctionner les turbines à vapeur pour la production d'énergie ou pour les échangeurs de chaleur utilisés pour chauffer les flux de processus dans l'industrie (AUTRET .E *et al.* , 2007). Les procédés de conversion thermique de base sont la pyrolyse et la carbonisation hydrothermale. Les déchets alimentaires sont brûlés à des températures inférieures à 450 °C et deviennent gazeux à des températures supérieures à 800 °C lors de la pyrolyse. La carbonisation hydrothermale est un processus humide qui convertit les déchets alimentaires en une ressource précieuse et riche en énergie sous des pressions autogènes et une température relativement basse (180-350°C) par rapport à la pyrolyse (PHAM TP.T *et al.* , 2015 ; KOÇ, 2017).

I.6.2. Conversion chimique

Dans l'industrie agroalimentaire, les réactions d'hydrolyse et d'oxydation sont principalement utilisées comme méthodes de conversion chimique pour les déchets et sous-produits alimentaires. A rapporté que les déchets alimentaires ou les sous-produits riches en amidon et en protéines peuvent être traités avec des acides ou des enzymes appropriés pour produire des produits précieux tels que le maltose, le glucose et les acides aminés. L'extraction par solvant est également préférée pour extraire des acides organiques précieux, des vitamines, des antioxydants, des composés phénoliques, des agents colorants des déchets alimentaires et des sous-produits. *Idem.*

Des parties précieuses des déchets alimentaires et des sous-produits peuvent également être extraites par des techniques d'extraction verte où l'eau est principalement préférée comme moyen d'extraction plutôt que l'extraction par solvant organique. (BARBA *et al.*, 2016) ont examiné en détail les méthodes d'extraction alternatives telles que les champs électriques pulsés, les décharges électriques à haute tension, le chauffage ohmique pulsé, les ultrasons, les extractions assistées par micro-ondes, les extractions de fluides sous- et supercritiques, ainsi que l'extraction de liquide sous pression pour la récupération de composés antioxydants bioactifs des déchets et sous-produits de la cave. *Idem.*

I.6.3. Conversion biologique

La récupération d'énergie et de composés bioactifs à partir de déchets alimentaires et de sous-produits par traitement biologique suscite actuellement un intérêt croissant dans le monde entier. Les déchets alimentaires ont une teneur élevée en humidité et en matière organique et constituent donc un substrat idéal pour la digestion anaérobie. Le processus de digestion anaérobie comprend quatre étapes : hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse et méthanogénèse. Le pH, la température et le taux de charge organique ont un effet sur l'acidogénèse des déchets alimentaires. Le compostage des déchets alimentaires et des sous-produits est également l'une des méthodes de conversion biologique. Le compostage est un processus biologique dans lequel les matières organiques sont décomposées et les nutriments et minéraux sont libérés. *Idem.*

I.7. Valorisation des sous-produits et des déchets de l'IAA

I.7.1. Sous-produits et les déchets des fruits et des légumes

Les industries de transformation des fruits se développent dans le monde entier, ce qui génère des flux de déchets composés de marc, constitués en grande partie de tissus mous, de tiges, de noyaux, de graines et de pelures (GABRIELA *et* GANJYAL., 2018), et les tiges sont généralement utilisées comme aliments pour animaux (ANAL., 2018). Ces

composants de grande valeur comprennent des fibres alimentaires, des nutriments, des protéines, des peptides, des composés phénoliques, des polysaccharides, des arômes et des composés phytochimiques (**tableau I.1**) (LEE *et al.*, 2020).

I.7.1.1. Sous-produits des fruits

Le type de sous-produits dépend principalement du type de fruit. Les fruits peuvent être classés selon les caractéristiques physiques de la peau et des graines, cette classification sert également à définir la méthode et les étapes de traitement nécessaires. Les pépins (par exemple les pommes et les poires) sont une source attrayante de composés bioactifs. Habituellement, le fruit entier est pressé pour extraire le jus produisant des sous-produits sous forme de marc (peau, graines et restes de pulpe), qui est jeté après le traitement des jus, confitures, gelées, barres aux fruits et marmelades. Le marc de pomme (environ 25 % du poids des fruits frais) est riche en composés phénoliques qui peuvent agir comme agents anti-radicalaires, montrant des propriétés antioxydantes. La quantité de composés phénoliques totaux (CPT) est plus élevée dans les graines que dans la peau, et est plus élevée dans la peau que dans la pulpe (MARCILLO-PARRA *et al.* 2021).

L'industrie des jus rejette de grandes quantités de sous-produits du raisin sous forme de marc de raisin pressé. Diverses études ont identifié de nombreux composés phénoliques laissés dans le marc de raisin par différentes méthodes d'extraction. Les graines ont montré plus d'activité (CPT) et antioxydante que la peau. Les composés phénoliques ont montré des avantages potentiels pour la santé cardiovasculaire et métabolique, la prévention du cancer et possèdent une activité antioxydante, anti-inflammatoire et antimicrobienne *Idem.*

Les fruits juteux tels que la grenade, générant de nombreux sous-produits. Les sous-produits de la grenade (jusqu'à 40 % de l'ensemble) contiennent une quantité plus élevée de composés phénoliques, qui ont montré des propriétés antioxydantes, antibactériennes, anti-allergiques et anti-inflammatoires. *Idem.*

- Déchet et des sous-produits des végétaux

La manipulation, la commercialisation et la transformation des légumes produisent une quantité importante de sous-produits. Les légumes sont transformés à différentes fins, notamment la mise en conserve, le jus, le concentré, la confiture et les boissons fermentées. Comme pour les fruits, les sous-produits dépendent du type de légumes. Les légumes peuvent être classés en fonction de la partie comestible de la plante qui est transformée pour la consommation humaine. Lorsque différentes parties d'une même plante

sont comestibles, elles peuvent appartenir à plusieurs catégories, par exemple, les racines et les feuilles de betterave peuvent être consommées (**MARCILLO-PARRA et al. 2021**).

Dans le cas des fleurs comestibles de certains légumes, comme l'artichaut, le brocoli et le chou-fleur, la partie non transformée est considérée comme un sous-produit. La (CPT), la teneur totale en flavonoïdes (CPT) et l'activité antioxydante des sous-produits de l'artichaut varient considérablement selon la position des bractées de la tête de l'artichaut et les traitements thermiques utilisés (**RUIZ-CANO et al., 2014**). Les fractions les plus intéressantes pour une utilisation en tant qu'ingrédients fonctionnels sont situées au plus près du cœur d'artichaut. *Idem*.

Les bulbes sont des légumes qui poussent généralement juste sous la surface du sol et produisent une pousse charnue et feuillue au-dessus du sol, souvent constituée de couches de segments groupés, par exemple des oignons. Les sous-produits de l'oignon provenant de la manipulation et de la transformation et de la production industrielle de graines d'oignon ont montré une quantité intéressante de composés bioactifs et une activité antioxydante remarquable, tout en fournissant un effet anti-brunissement efficace ; mettant ainsi en évidence leur utilisation potentielle en tant qu'ingrédients fonctionnels (**FERNANDEZ et al., 2018 ; ROLDAN et al., 2008**) *Idem*.

Les légumes dont la partie comestible est une racine pivotante longue ou ronde sont classés comme racines (par exemple, les carottes) ; tandis que lorsqu'ils poussent sous terre sur une racine de plante, ils sont connus sous le nom de tubercules (par exemple, les pommes de terre). Ils sont transformés de diverses manières (hachés, congelés et en conserve) et le traitement commence par le pelage et le retrait du haut et du bas, produisant des sous-produits. La peau des carottes est riche en composés phénoliques et en caroténoïdes (**SEREGELJ et al., 2021 ; KAMILOGLU et al., 2016**) ont signalé une teneur élevée en (CPT) et en anthocyanes totales (CPT) dans les sous-produits de la transformation de la carotte noire. Ils ont mentionné que les composés phénoliques sont l'un des principaux contributeurs à l'activité antioxydante de l'extrait. Ces dernières années, la consommation de pommes de terre transformées a augmenté sous forme de gâteaux, croquettes, snacks, purée, poudre déshydratée et même d'amidon modifié préparé. De nombreuses tonnes de pelure sont générées à la suite de ce traitement. Le (CPT) est plus élevé dans la peau que dans la partie charnue comestible, et les extraits phénoliques ont montré une activité antioxydante considérable et d'autres propriétés fonctionnelles (**AKYOL et al., 2016**). D'autres variétés de pommes de terre colorées, comme la patate

douce coréenne à chair violette (cultivar 'Shinzami'), ont montré une teneur singulière en anthocyanes (KIM *et al.*, 2012). *Idem.*

La plupart des études sur les déchets et les sous-produits des fruits et des légumes sont concentrées sur les composés phénoliques et les caroténoïdes et leurs sous-types : ils sont les plus abondants, sont largement distribués dans les plantes et peuvent offrir des avantages pour la santé. Cependant, d'autres composés bioactifs, tels que les terpènes et les alcaloïdes, sont également d'origine naturelle, et ces résultats indiquent un besoin de recherches futures sur leur caractérisation et leur identification. (MARCILLO-PARRA *et al.* 2021).

I.7.1.2. Sous-produits et les déchets d'origine animale

La transformation des animaux à des fins alimentaires entraîne la production de déchets, notamment : (i) des boues de lait, du lactosérum et du caillé, (ii) des carcasses, des viscères, de la graisse, des parures de viande, des sabots, des peaux, des plumes, des têtes, des os, du sang, l'urine et la viande, et (iii) les peaux, les viscères, le sang, l'huile, les prises accessoires, hors spécifications, les boutures, les os et les déchets (LEE *et al.*, 2020).

I.8. Déchets industriels de transformation de viande et de volaille

Les plumes de volaille, produites à raison de 1,8 million de tonnes par an, sont une bonne source de protéines structurelles, notamment de kératine contenant de la sérine et de la cystéine. Les os, produits à raison de 16 à 45 millions de tonnes, sont composés de minéraux essentiels, de calcium, de lipides et de protéines, mais ne sont pas exploités efficacement. La peau contient également des protéines en grande quantité. La gélatine obtenue à partir du traitement du collagène a des propriétés fonctionnelles (JAYATHILAKAN *et al.*, 2012). Les industries de transformation de la viande et de la volaille rejettent 16 à 45 millions de tonnes d'os. Les os étant riches en calcium, en minéraux essentiels, en protéines et en lipides, ils peuvent être utilisés comme sources potentielles de protéines pour les fonctions corporelles (DONG *et al.*, 2014). La membrane de la coquille d'œuf, constituant jusqu'à 11% du poids de l'œuf, est une bonne source de protéines, de polypeptides et de polysaccharides, générant des possibilités d'applications alimentaires et nutraceutiques.

I.9. Déchets industriels de transformation des produits de la mer

En général, les déchets générés par l'industrie marine servent de farine de poisson et d'engrais, mais peuvent être traités pour produire des composés bioactifs pour les entreprises nutraceutiques et pharmaceutiques. Le collagène peut être obtenu à partir des os, de la peau et des tendons avec des applications dans divers domaines, notamment la

formation de films, d'émulsions, la fixation d'eau et la formation de gel. La gélatine dérivée du collagène peut être appliquée pour améliorer la texture et la stabilité de la viande et des produits de boulangerie. Les hydrolysats de protéines et les peptides récupérés à partir d'hydrolysats de fruits de mer peuvent être utilisés comme antihypertenseurs, antimicrobiens et antioxydants. Les acides gras polyinsaturés peuvent être extraits des viscères, du foie et des estomacs de poisson. Les acides gras oméga-3 sont connus pour protéger les êtres humains contre les troubles nerveux et cérébraux, les maladies cardiovasculaires et les maladies rénales (ANALAVA *et al.*, 2014).(*idem*) .

I.10. Biomolécules issues de biodéchets d'origine végétale

En raison des quantités croissantes de déchets agro-industriels, plusieurs études se sont concentrées sur la caractérisation de composés bioactifs, principalement dans le cas des déchets et sous-produits des fruits et des légumes. Ces résidus organiques peuvent fournir une source bon marché de composés bioactifs qui peuvent être utilisés pour développer de nouveaux ingrédients ou additifs pour les produits alimentaires fonctionnels (MARCILLO-PARRA *et al.* 2021) (*idem*).

I.10.1. Pectines

Le traitement des agrumes, qui comprend les citrons verts, les raisins, les citrons et les oranges, entraîne la génération de déchets, qui peuvent être utilisés pour produire du limonène, des pectines, des fibres et des flavonoïdes. Le marc de pomme séché, le zeste d'agrumes et la betterave sucrière traités avec de l'acide minéral dilué chaud ont entraîné la production de 10 à 30 % de pectines et de flavanones. La teneur en pectine (poudre) du marc de pomme, de l'extrait de goyave épuisé et du zeste de citron vert dans des conditions optimisées se situait entre 0,05 et 0,06 % (CHAKRABORTY et RAY., 2011). La pectine a un large éventail d'utilisations dans les industries pharmaceutiques, cosmétiques et alimentaires en tant qu'agents épaississants et gélifiants *Idem*.

I.10.2. Huiles essentielles

Les huiles essentielles peuvent être produites en tant que coproduit de l'extraction de jus à partir d'écorces et de graines d'agrumes (WALDRON., 2009). L'huile est composée principalement de 72,5% d'acide oléique, 13,5% d'acide palmitique et 4,5% d'acide stéarique. L'huile contient des acides gras monoinsaturés, qui ont révélés être efficaces dans les contractions vasculaires et dans la réduction des maladies coronariennes. *Idem*.

I.10.3. Antioxydants

Les antioxydants aident les humains dans la prévention des maladies. La peau de raisin est une bonne source d'anthocyanes, qui peuvent être utilisés comme antioxydants ou colorants. L'extraction d'antioxydants à partir de déchets végétaux solides, notamment la chicorée, le céleri, le chou-fleur et les asperges, a été étudiée par diverses techniques d'extraction. L'activité antioxydante la plus élevée a été enregistrée dans les déchets de chicorée à l'aide de méthodes d'extraction conventionnelles et par micro-ondes (BAIANO, 2014). Les graines et les zestes d'agrumes se sont avérés être une bonne source de flavonoïdes tels que l'ériocitrine, la naringine, la narirutine et l'hespéridine, qui contiennent des propriétés antioxydantes. Les peelings sont une riche source de limonoïdes - acide nomilique, nimolin et limonine, qui se sont avérés être des composés antimicrobiens, antiviraux et antibactériens efficaces *idem*.

I.10.4. Molécules nutraceutiques

Les nutraceutiques se trouvant dans divers fruits et légumes ; par exemple la tomate, est une matière première qui est traitée pour produire des sous-produits comme la pâte, le ketchup, le jus et les soupes. La pulpe, les pelures et les graines, qui constituent les déchets, sont présentes en proportion presque égale et sont de riches sources de graisses, de protéines et de caroténoïdes (lycopène). De plus, les graines de tomates sont une bonne source d'huile comestible, riche en acides gras insaturés. *Idem*.

I.10.5. Phénoliques

Les polyphénols ou les composés phénoliques ont une grande utilité en tant qu'aliments fonctionnels. Les plantes produisent des structures phénoliques en grande partie des flavonoïdes ainsi que des tanins, des acides phénoliques, des lignanes et des aspigments de stilbènes, en tant que mécanisme de défense contre les rayons UV, les oxydants et les aliments. Ces composés peuvent être utilisés pour améliorer la santé humaine en prévenant le stress oxydatif, les maladies dégénératives, neurodégénératives, et les maladies cardiovasculaires. Ces composés phytochimiques sont largement distribués dans les aliments et les fruits tels que les canneberges, les pamplemousses, les pommes, les cerises, les fraises, les framboises, les mûres, le sorgho et le houblon, les agrumes, le soja et les trèfles rouges (GABRIELA GANJYAL., 2018). *Idem*.

I.10.6. Acide citrique

L'acide citrique (AC) est un métabolite naturel non toxique et biodégradable présent dans divers organismes. En raison de ses caractéristiques uniques en tant qu'agent chélatant, antioxydant, conservateur, acidulé, émulsifiant et exhausteur de goût, il a des

applications dans les domaines alimentaire, pharmaceutique et cosmétique. Les microbes peuvent produire du (AC) à partir de saccharose et d'amidon présents dans des ressources renouvelables telles que la mélasse de betterave et de canne, les déchets de fruits, y compris les pelures de banane, les déchets de dattes, les déchets d'agrumes et le marc de pomme. *Idem.*

I.10.7. Acide lactique

L'acide lactique (AL) peut être facilement transformé en une large gamme de molécules bioactives telles que l'acétaldéhyde, l'acide propionique, le 1,2-propanediol, le lactate d'éthyle, l'acide acrylique et l'acide pyruvique. Ces molécules ont un grand potentiel pour des applications biotechniques dans les industries traitant de l'alimentation, du cuir textile, des cosmétiques, des produits pharmaceutiques et des plastiques biodégradables - les poly-LA *idem.*

Des déchets alimentaires riches en amidon prétraités avec un mélange d'enzymes amylolytiques contenant de l' α -amylase, de l'amyloglucosidase et de la protéase ont été fermentés par *Lactobacillus delbrueckii* pour produire de l'acide lactique.

I.11. Enzymes

L'hydrolyse enzymatique, est une technique importante et significative pour la transformation des déchets agricoles en produits de valeur. L'utilisation des déchets agricoles offre un grand potentiel pour réduire les coûts de production et augmenter l'utilisation d'enzymes à des fins industrielles. Les déchets agro-industriels tels que la paille de blé, la bagasse de canne à sucre, le son de riz, le son de blé, les rafles de maïs, etc. Actuellement, divers substrats et sous-produits de déchets agricoles ont été étudiés avec succès pour la production de cellulases par une fermentation à l'état solide basée sur une culture microbienne. D'après une étude récente, des protéases, des -amylases, des cellulases et des pectinases ont été obtenus par un *Bacillus* sp. TMF-1 en fermentation à l'état solide sur des sous-produits agricoles.

I.12. Fibres alimentaires

Les industries de transformation alimentaire traitant de la viande, des fruits de mer, des fruits, des légumes et des sous-produits laitiers, peuvent être transformés davantage pour extraire des protéines alimentaires, des peptides et des acides aminés essentiels. La demande d'aliments riches en fibres d'origine fruitière et végétale a augmenté en raison de leurs bienfaits pour la santé tels que la réduction du risque de diabète, d'obésité et de maladies cardiaques *Idem.*

Les fibres alimentaires comprennent les glucides tels que la cellulose, l'hémicellulose, l'amidon résistant, les gommés et la pectine. Les hémicelluloses sont des biopolymères qui peuvent être extraits du marc de fruits (poire). Dans les confitures de fraises, il y a eu un changement pour augmenter l'utilisation de fibres alimentaires de pêche au lieu de pectine industrielle (**GABRIELA ET GANJYAL., 2018**). Les fibres alimentaires ont été utilisées dans les produits carnés pour réduire la valeur calorifique et la teneur en matières grasses, et pour améliorer leur stabilité et leur texture.

L'ajout de fibres alimentaires, en particulier d'inuline, à la crème glacée et au fromage améliore le volume et la sensation en bouche. Les marcs de fruits ont servi de source de fibres alimentaires pour réduire l'importance de la farine de blé dans les produits de boulangerie. Il aide à préserver la fraîcheur en conservant le taux d'humidité souhaité et améliore la valeur nutritionnelle du pain. Le marc de pomme a été utilisé dans les biscuits à l'avoine et la tarte aux pommes. Des fibres provenant de déchets d'agrumes ont été ajoutées à la pâte congelée, au pain et aux biscuits. marc d'orange, ajouté à raison de 5,5% dans des préparations de pain sans gluten, texture et volume de miche conservés (**GABRIELA et GANJYAL, 2018 ; O'SHEA et al., 2015**) (*idem*).

Les fibres alimentaires du son de céréales sont riches en xylanes, arabinoxylanes et acides phénoliques (acide férulique), qui ont des applications potentielles comme antioxydants La transformation du soja en lait de soja et en tofu donne lieu à la production d'okara, qui contient 50 % de fibres alimentaires. Il contient également des protéines et des graisses, telles que les acides oléique et linoléique, qui peuvent être utilisées pour enrichir les aliments. *Idem*.

Des exemples de biomolécules extraites des déchets et des sous-produits alimentaires avec leur rendement et le secteur d'application sont mentionnés dans le tableau suivant.

Tableau. I.1. Exemples de Biomolécules extraites des bio-déchets (LEE *et al.*, 2020).

Biomolécule extractible	Substrat	Rendement (%)	Applications
- Pectine	- Écorces d'agrumes, marc de pomme	- 10-30	- Polymère naturel pour l'administration de médicaments, la formation de gel, liant d'eau et polymère mucoadhésif
- Fibres alimentaires	- marc de pomme	- 10–11.8	- Promotion de la santé humaine
- Huiles essentielles (matricine, Chamazulène, α-bisabolol)	- Camomille	- 28 ; 0,05 ; 2,68	- Industries alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques, traitement des affections, y compris la digestion, les troubles du sommeil, la cicatrisation des plaies et les infections cutanées
- Anthocyanes	- Peaux de raisin	- Variable	- Fabrication de cosmétiques, agroalimentaire, industrie pharmaceutique et développement de crème solaires
- β-glucanes	- Son d'orge	- Variable	- Améliore le métabolisme des lipides, réduit l'index glycémique et abaisse le cholestérol plasmatique
- Collagène et gélatine	- Peau, arêtes et nageoires de poisson	- 49–58	- Ophtalmologie, alimentation et cosmétique
- Flavanones	- Écorces et résidus d'agrumes après pressage segments et graines	- Variable	- Phytomédicaments, nutraceutiques, anticancéreux et antipaludiques

I.13. Production de biocarburants et de bioénergie

Les déchets alimentaires se caractérisent par une composition chimique variable selon leur origine de production. Les déchets alimentaires (DA) peuvent donc être formés par un mélange de glucides, de lipides et de protéines, ou, s'ils sont générés par des filières agro-industrielles spécifiques, peuvent être riches en l'un de ces constituants. Différents biocarburants sont donc produits à partir de Déchets Alimentaires (DA) à l'aide de bioprocédés ou de procédés thermochimiques, selon leur composition chimique (**GIROTTO et al ., 2015**)

Les déchets alimentaires (DA) peuvent être convertis en biocarburants ou en énergie au moyen des procédés suivants :

- la transestérification des huiles et graisses pour produire du biodiesel ;
- fermentation d'hydrates de carbone pour produire du bioéthanol ou du biobutanol ;
- méthanisation pour produire du biogaz (gaz riche en méthane) ;
- fermentation sombre pour produire de l'hydrogène ;
- pyrolyse et gazéification ;
- carbonisation hydrothermale
- l'incinération *Idem*.

I.14. Domaines de valorisation des déchets et sous produits de l'industrie agroalimentaire

Les déchets et les sous produits issus de l'industrie agroalimentaire et de la transformation industrielle des matières premières peuvent être valorisés pour préserver l'environnement et avoir des retombées économiques ; nous avons deux sortes de valorisations : valorisation matière et valorisation énergétique. Chaque type de valorisation a ses avantages et ses limites. (**LE BIHAN., 2011**).

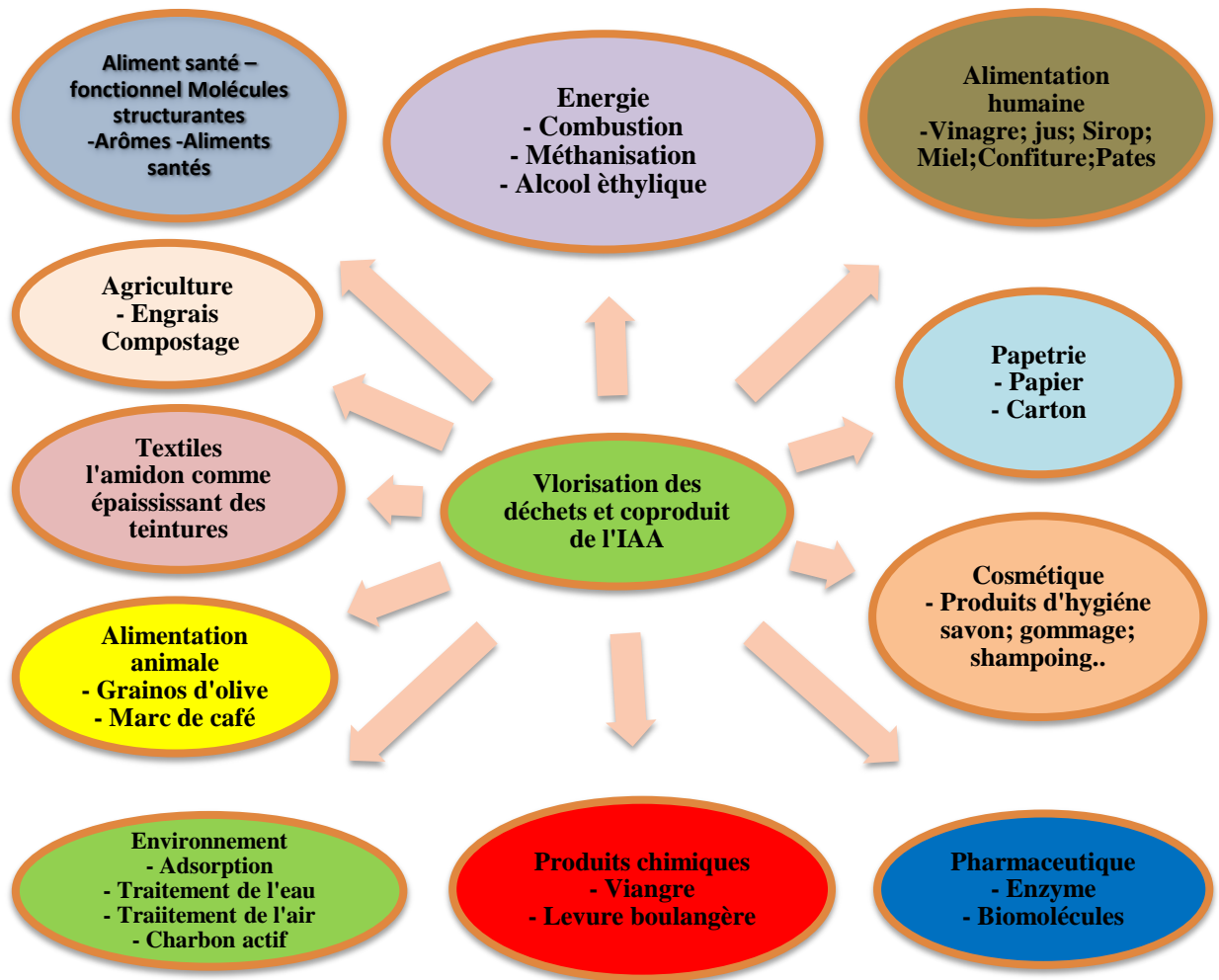


Figure I.02 : Types de valorisation des résidus et déchets de L'IAA

(AMOKRANE., 2010 ; LE BIHAN., 2011)(Modifié)

I.15. Avantages et inconvénients

**Tableau I. 2. a. Avantages et inconvénients des différents types de valorisation :
Agriculture (LE BIHAN, 2011)**

Avantages	Inconvénients
Marché très important	Faible valeur ajoutée
Large répartition géographique	Nécessité de volumes conséquents
Peu contraignant	Nécessité de stockage
Process simple, économique	Logistique et transport (cout élevés)
Compostage : permet une hygiénisation de la MO et une réduction de la MO	Problèmes liés aux toxiques et à l'azote / Risques de pollution des sols
Concurrence sur les matières premières	Utilisation de déchets en épandage reste controversée
	Possibles nuisances
	Nécessite un plan d'épandage
	Saisonnalité des besoins et des apports

**Tableau I. 2.b. Avantages et inconvénients des différents types de valorisation :
Energétique. *Idem.***

Avantages	Inconvénients
Marché très important	Faible valeur ajoutée
Large répartition géographique	Nécessité de volumes conséquents
En pleine expansion	Contraintes réglementaires lourdes
Cahier des charges peu contraignant	Investissement important
Process relativement simple	Nécessite un ensemble de MO cohérent (méthanisation)
Contribue, suite à la valorisation, à réduire les quantités de déchets ultimes	Ne permet pas de traiter toutes les fractions de matière organique
Contexte favorable (coût de l'énergie)	Méthanisation : pilotage très fin par du personnel a plein temps
	Méthanisation = exploitation plus complexe que le compostage et coûts

	plus élevés (nécessité d'un tri préalable rigoureux)
	Saisonnalité des apports

Tableau I. 2.c. Avantages et inconvénients des différents types de valorisation : Animale. *Idem.*

Avantages	Inconvénients
Marché très important ;	Faible valeur ajoutée
Large répartition géographique	Nécessité de volumes conséquents
Process simple (mais qui peut être couteux = farines)	Nécessité de stockage dans de bonnes conditions sanitaires
Concurrence sur les matières premières utilisées classiquement	Tri
	Réglementation stricte
	Problèmes liés aux toxiques qui peuvent être présents – Encephalopathie Spongiforme <i>Bovine (ESB)</i>
	Saisonnalité des besoins et des apports

Tableau I. 2.d. Avantages et inconvénients des différents types de valorisation : Nutrition : humaine et animale *Idem.*

Avantages	Inconvénients
Marché important	Nécessité de stockage dans de bonnes conditions sanitaires Saisonnalité des besoins et des apports
Large répartition géographique	Cahier des charges strict
Une demande croissante	Tri
Retour à un approvisionnement de proximité	Problèmes liés aux toxiques qui peuvent être présents
Concurrence sur les matières premières utilisées classiquement	

**Tableau I. 2.e. Avantages et inconvénients des différents types de valorisation :
Aliment santé –fonctionnel *Idem.***

Avantages	Inconvénients
Forte valeur ajoutée (mais marché de plus petit volume voir de niche)	Nécessité de stockage dans de bonnes conditions sanitaires
Une demande croissante	Cahier des charges strict et contraignant
Retour à un approvisionnement de proximité	Tri
Retour à la naturalité	Problèmes liés aux toxiques qui peuvent être présents
Concurrence sur les matières premières utilisées classiquement	Réglementation de plus en plus contraignante Volume faible

**Tableau I. 2.f. Avantages et inconvénients des différents types de valorisation :
Nutraceutique –cosmécéutique *Idem.***

Avantages	Inconvénients
Forte valeur ajoutée (mais marché de niche)	Nécessité de stockage dans de bonnes conditions sanitaires
Une demande croissante	Cahier des charges strict et contraignant
Retour à un approvisionnement de proximité	Tri
Retour à la naturalité	Problèmes liés aux toxiques qui peuvent être présents
Concurrence sur les matières premières utilisées	Réglementation complexe et en évolution constante
	Volume faible

(LE BIHAN, 2011)

I. 16. Exemple type de valorisation dans l'IAA

L'Algérie est un pays producteur de l'huile d'olive, la Wilaya de Djelfa à récemment fait son entrée dans ce secteur avec les autres régions.

Nous allons prendre l'olivier et la fabrication de l'huile d'olive comme exemple illustratif des possibilités offertes dans différents domaines, voir le digramme de la **(Figure I.3) (FEDERICI *et al.* 2009)**.

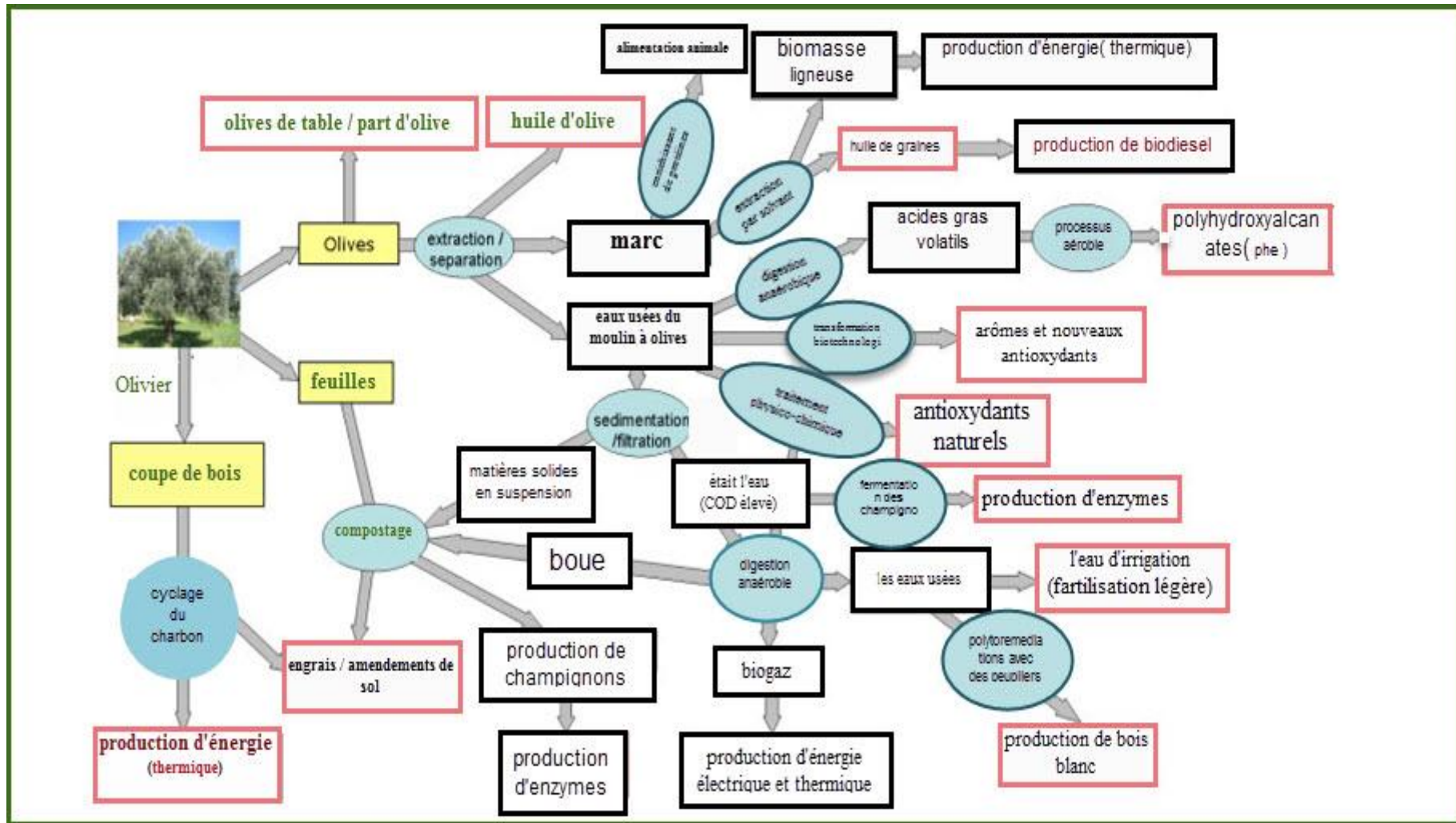


Figure I.03 : La « bioraffinerie d'oliviers » avec les processus OMW «marges» associés, la valorisation et l'élimination des sous-produits et des déchets (FEDERICI *et al.*, 2009).

I. 17. Conclusion

L'industrie agroalimentaire, de part sa nature génère de grandes quantités de déchets et de résidus organiques, solides et liquidés qui ont un impact environnemental et socioéconomique notable.

Suite à la prise de conscience écologique par les populations et les gouvernements, et une forte pression politique, sociale et réglementaire, la plupart des grandes entreprises tentent de s'adapter à cette nouvelle réalité en modifiant leurs procédés industriels afin que leurs résidus puissent être traités, valorisés et recyclés pour stopper ou diminuer la pollution due aux activités industrielles et ne considèrent plus les résidus comme des déchets, mais comme une matière première à mettre en valeur par des techniques existantes ou innovantes.

Il existe dans la littérature scientifique et dans la pratique industrielle ; plusieurs techniques pour la conversion de la biomasse végétale et animale en énergie et en produits, en particulier la conversion thermique, chimique et biologique ; suite à ces transformations nous pouvons obtenir des molécules à forte valeur ajoutée.

Suite à ces transformations, différentes types de valorisations possibles des sous-produits et des déchets des activités agronomiques et des industries alimentaires, souvent techniquement réalisables, Il s'agit notamment dans le domaine agronomique, alimentaire, santé, environnement, alimentation animale, matériaux et énergie.

Chaque type de valorisation a ses points forts et ses limites : c'est la raison pour laquelle, il est impérative de réaliser des études de toxicité et d'écotoxicité en plus de l'étude technico-économique des projets de valorisation.

Cette synthèse partielle et incomplète a mis en évidence l'applicabilité de la valorisation des sous-produits et les déchets de l'industrie agroalimentaire comme matières premières pour divers applications ; et pour optimiser cette valorisation nous pouvons recommander le recours aux outils de la bio économie circulaire et les techniques de la chimie verte et aux concepts du développement durable.

Liste des références bibliographiques

1. **AMOKRANE S.**, 2010-*Etude des prétraitements microbiologiques des résidus agro-alimentaires lignocellulosiques en vue de leur valorisation en alimentation animal*. Thèse de Magistère, Inst. Nati. Bio., Constantine, p 118.
2. **ANALAVA, M., BAISHAKHI, D., ANINDYA, M.**, 2014- Recovery of omega-3 health boosters from fisheries and poultry wastes and their micro-delivery techniques. *Int. J. Drug Delivery Sci.* (1); 1–13.
3. **AUTRET E, BERTHIER F, LUSZEZANEC A, NICOLAS F.**, 2007-Incineration of municipal and assimilated wastes in France: Assessment of latest energy and material recovery performances. *J Hazard Mater* 139(3): 569-574.
4. **AUTRET E, BERTHIER F, LUSZEZANEC A, NICOLAS F.**, 2007- Incineration of municipal and assimilated wastes in France: Assessment of latest energy and material recovery performances. *J Hazard Mater* 139(3): 569-574.
5. **BAIANO, A.**, 2014- Recovery of biomolecules from food wastes - a review. *Molecules* (19); 14821–14842.
6. **BARBA FJ, ZHU Z, KOUBAA M, SANTANA AS, ORLIEN V.**, 2016- Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology* 49: 96-109.
7. **BARBA FJ, ZHU Z, KOUBAA M, SANTANA AS, ORLIEN V.**, 2016- Green alternative for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology* 49: 96-109.
8. **CHAKRABORTY, D., VENKATA MOHAN, S.**, 2019- Efficient resource valorization by co-digestion of food and vegetable waste using three stage integrated bioprocess. *Bioresour. Technol.* 284; 373–380.
9. **DE LA RUBIA MA, RAPOSO F, RINCÓN B, BORJA R .**, 2009- Evaluation of the hydrolytic-acidogenic step of a two-stage mesophilic anaerobic digestion process of sunflower oil cake. *Bioresour. Technol.* 100 (18): 4133-4138.
10. **DONG, X.B., LI, X., ZHANG, C.H., WANG, J.Z., TANG, C.H., SUN, H.M., JIA, W., LI, Y., CHEN, L.L.**, 2014- Development of a novel method for hot-pressure extraction of protein from chicken bone and the effect of enzymatic hydrolysis on the extracts. *Food Chem.* 157; 339–346.
11. **FAO. (2011).** *Global food losses and food waste – extent, causes and prevention*.
12. **FAO. (2019).** *The State of Food and Agriculture. Moving forward on food loss and waste reduction*. Rome: Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

13. **FEDERICI F, KALOGERAKIS N AND MANTZAVINOS D.**, 2009-Valorisation of agro-industrial by-products, effluents and waste: concept, opportunities and the case of olive mill wastewaters. *J ChemTechnolBiotechnol*, **84**: 895–900.
14. **GARCIA-GARCIA, G., WOOLLEY, E., RAHIMIFARD, S.**, 2015- A framework for a more efficient approach to food waste management. *Int. J. Food*, (1): 65–72.
15. **GARCIA-GARCIA1 G, WOOLLEY E, RAHIMIFARD S, COLWILL, ROD J, and LOUISE NEEDHAM.**, 2017 -A Methodology for Sustainable Management of Food Waste. *Waste Biomass Valor*, 8: 2209–2227.
16. **GARNETT .T .**, 2011-Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy* (36):p23–32.
17. **GIROTTO F , ALIBARDI F AND COSSU R.**, 2015- Food waste generation and industrial uses: A review.*Waste Management* , 45 : 32–41.
18. **GRIGORAS . C-G.** Valorisation des fruits et des sous-produits de l'industrie de transformation des fruits par extraction des composés bioactifs. Sciences agricoles.Bacău : Université d'Orléans et de l'Université « Vasile Alecsandri », 2012 262p.
19. **HOEKSTRA AY, MEKONNEN ,MM .**, 2012 The water footprint of humanity. *ProcNatlAcadSci U S A* 109(9) : 3232–3237.
20. **JAYATHILAKAN, K., SULTANA, K., RADHAKRISHNA, K., BAWA, A.S.**, 2012- Utilization of by-products and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *J. Food Sci. Technol.* 49; 278–293.
21. **JIANG J, ZHANG Y, LI K, WANG Q, GONG C, ET AL.**, 2013-Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. *BioresourceTechnol* 143: 525-530.
22. **JORADP 43 (2003).** Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
23. **JORADP 43 (2003).** Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
24. **Koç M.**, 2017- Conversion of Food Wastes and by-Products in to Value Added Products. 5(1): p1-3.
25. **KUMMU. M., DE MOEL, H., PORKKA. M., SIEBERT. S., VARIS, O. & WARD, P. J.**, (2012)-: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use . *The Science of the Total Environment*, 438: 477–489.

26. **LE BIHAN, E.** La valorisation des déchets de l'industrie agroalimentaire (En ligne). Créée en 25-janvier 2011(<http://www.anea-normandie.com/wp-content/uploads/pr%C3%A9sentation-Ivamer->), consulté le 09/10/13, non disponible.
27. **LEE J-K, PATELA S, SUNGB B, KALIA V.**, 2020- Biomolécules from municipal and food industry wastes. *Bioresource Technology* 298 () 122346.
28. **MARCILLO-PARRA .V, SANTIAGO TUPUNA-YEROVI .D ,GONZALEZ Z,** and **JENNY RUALES A .,** 2021- Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application.*Trends in Food Science & Technology*, 116: 11–23.
29. **MARCILLO-PARRA V, SANTIAGO D TUPUNA-YEROVI, GONZALEZ Z , RUALES J .,** 2021- Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application. *Trends in Food Science & Technology*, 116: 11–23.
30. **MOLETTA R., 2006** – *caractérisation des effluents des industries agroalimentaires* .16-26 cité par **REMY GOUDDONVALERIEDESAUZIERS.**, gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaire, Ed TEC et DOC. parie, p 719.
31. **NEWMAN D, CEPEDA-MÁRQUEZ R, ZELLER K.,** 2018- Global food waste management: an implementation guide for cities. *World Biogas Assoc:* p20.
32. **O'CONNOR. J, SON A. HOANG, BRADNEY. L, DUTTA S., XIONG. X, DANIEL C.W. TSANG, RAMADASS. K, VINU.A., KIRKHAM. and NANTHI S .M.B. BOLAN .,** 2021- A review on the valorisation of food waste as a nutrient source and soil amendment.*Environmental Pollution*,272 (2021) 115985.
33. **PFALTZGRAFF, L.A. ET.** (2013) Food waste biomass: a resource for high-value chemicals. *Green Chem.* 15, 307–314.
34. **PHAM TPT, KAUSHIK R, PARSHETTI GK, MAHMOOD R, BALASUBRAMANIANR .,**2015- Food waste-to energy conversion technologies: *Current status and future directions.* *Waste Manage* 38: 399-408.
35. **PHAM TPT, KAUSHIK R, PARSHETTI GK, MAHMOOD R, BALASUBRAMANIAN R.,** 2015-Food waste-to-energy conversion technologies: Current statusand future directions. *Waste Manage* 38: 399-408.
36. **RAVINDRAN. R and AMIT K. J,** (2016) - Review Exploitation of Food Industry Waste for High-Value Products. *Trends in Biotechnology*, 34 (1): p 58-69.
37. **TAN, Y.A., SAMBANTHAMURTHI, R., SUNDRAM, K., WAHID, M.B.,** 2007. Valorisation of palm by-products as functional components. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*(109); 380–393.

38. **UNUOFIN J.**, 2021-*Food Wastes: Perceptions, Impacts and Management*. 175-196 **CITÉ PAR ALADEKOYI O. J, AND ODENIYI O. ,** Emerging Treatment Technologies for Waste Management, Ed Springer Nature Singapore, 265p
39. **ZUNGUR BA, TOMRUK D, KOÇ M, ERTEKIN KF.**, 2016 - Spray dried melon seed milk powder: physical, rheological and sensory properties. *J Food SciTechnol* 53 (5): 2396-2404.

An orange border with rounded corners and a scroll-like effect on the left and right sides, framing the chapter title.

***Chapitre II : Aperçu sur le
caféier et le café***

II.1. Introduction

Le café est un fruit du caféier, un arbuste tropical, attaché botaniquement à la famille des Rubiacées. Parmi les espèces recensées de café, seules *Coffea Arabica* et *Coffea canephora* (robusta) occupent une place importante dans la production et l'exportation. Ces deux espèces diffèrent par leur apparence et leur origine et enfin mais surtout par leur qualité et leur saveur. (JESZKA-SKOWRON *et al.*, 2015).

Le café est consommé par environ 40 % de la population mondiale (MUSSATTO *et al.*, 2011). Les exportations de toutes les formes de café par l'ensemble des pays exportateurs vers toutes les destinations ont totalisé 10,7 millions de sacs de 60 kg en juillet 2021, soit une augmentation de 1,7% par rapport aux 10,5 millions de sacs de juillet 2020. Le niveau des exportations totales en juillet 2021 est inférieur de 4,4% au volume de 11,9 millions de sacs enregistré en juillet 2019, avant la pandémie. (ICO, 2021).

La consommation mondiale de l'année caféière 2020/21 est estimée à 167,01 millions de sacs, soit une augmentation de 1,9% par rapport au niveau de 163,9 millions de sacs enregistré pendant l'année caféière 2019/20, et une baisse de 0,3% par rapport aux 167,6 millions de sacs observés pendant l'année caféière 2018/19 avant la pandémie. (ICO, 2021).

La boisson au café peut être consommée pour de nombreuses raisons, notamment ses effets stimulants résultant de la présence de caféine, d'une phytochimie riche, de bienfaits pour la santé et surtout d'un goût et d'un arôme excellents (POHL *et al.*, 2013).

Le but de ce chapitre est de présenter une synthèse bibliographique simplifiée sur le café du point de vue agronomique et botanique d'une part, et d'autre part avoir un aperçu sur la composition biochimique et les propriétés du café.

Ce chapitre se divise en deux parties :

- ❖ La première partie traite d'une façon sommaire de la botanique et de l'agronomie du caféier, ainsi que de la biochimie du café ;
- ❖ La deuxième partie présente une synthèse non exhaustive des déchets engendrés par la récolte, la transformation et la consommation du café.

II.2. Historique

Le café est l'une des boissons les plus populaires au monde et son importance commerciale n'a cessé de croître au cours des 150 dernières années (**DAGLIA et al., 2000**). Le mot café vient du mot arabe Quahweh. Aujourd'hui, sa popularité est identifiée par divers termes dans plusieurs pays tels que café (français), caffè (italien), kaffee (allemand), koffie (néerlandais) et coffee (anglais) (Smith, 1985). (**MURTHY et NAIDU, 2012**).

Les effets stimulants des grains de café torréfiés étaient bien connus et les Arabes ont apporté des graines de *Coffea arabica* d'Éthiopie au Yémen (péninsule arabique) au cours du XIII^e siècle et ont établi la première plantation. (**MURTHY et NAIDU, 2012**).

Au 15^e siècle, le café était cultivé dans le district yéménite de l'Arabie, puis fit son entrée en Perse, en Égypte, en Syrie et en Turquie dès le 16^e siècle. C'est avec les milliers de pèlerins du monde entier qui se rendaient à La Mecque que le café s'est fait connaître. On l'appelait autrefois le « vin d'Araby ». (**SCHWANKNER, 2019**).

La province de Kaffa en Éthiopie est considérée comme l'habitat d'origine du café Arabica et l'Afrique centrale est considérée comme le pays originaire du café robusta. Avec une culture extensive et largement répandue du café à travers le monde. (**MURTHY et NAIDU, 2012**).

Le café est le premier produit alimentaire et le deuxième bien de consommation échangé dans le monde. Devancé par le pétrole, le café se situe devant le charbon, la viande, le blé et le sucre. Il est produit principalement dans les pays émergents de l'hémisphère sud, mais il est consommé partout à travers le monde. (**SCHWANKNER, 2019**), le Brésil est actuellement le plus grand producteur et exportateur de café au monde. (**MURTHY et NAIDU, 2012**).

II.3. Classification botanique des caféiers

La classification des caféiers est schématisée sur la (Figure II. 01). Les caféiers appartiennent à la famille des Rubiacées qui comporte plus de 6000 espèces. Dans cette famille, les caféiers constituent la tribu *Coffeae* incluant deux genres : le genre *Psilanthus* spp, subdivisé en deux sous-genres, *Psilanthus* et *Afrocoffea*, et le genre *Coffea* L., subdivisé en deux sous-genres, *Coffea* et *Baracoffea*. Parmi les 124 espèces répertoriées à ce jour dans le genre *Coffea*, *Coffea arabica* L. et *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner, sont les deux espèces principalement exploitées pour fournir le café (DAVIS *et al.*, 2011). Toutes les espèces *Coffea* sont diploïdes, excepté *C. arabica* qui est allélotétraploïde. Cette espèce proviendrait du croisement spontané entre *C. eugenioides* (parent femelle) et *C. canephora* (parent mâle). (VESTALYS, 2018).

Les caféiers sont tous diploïdes ($2n = 2X = 22$) et quasiment tous strictement allogames à l'exception notable de *Coffea arabica* qui est un allotétraploïde ($2n = 4X = 44$) autocompatible. Toutes les espèces diploïdes du genre dériveraient d'un même génome ancestral ; *C. arabica* résulterait de l'association entre deux génomes diploïdes issus de deux espèces, dont *C. canephora*. (DURAND, 2012).

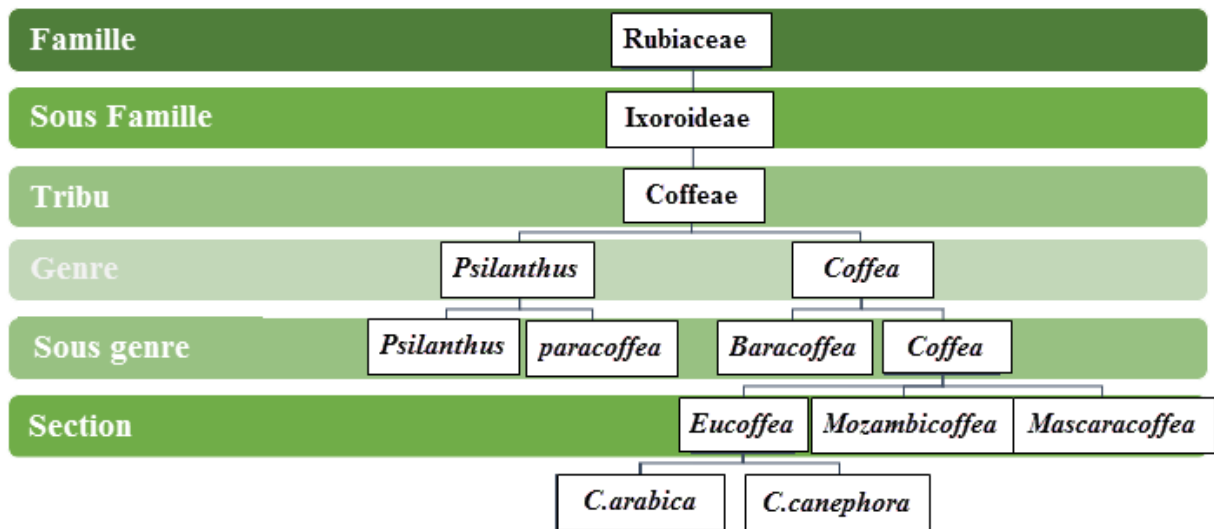


Figure II. 01 : Organigramme de la taxonomie du genre *Coffea* (VESTALYS, 2018)

II.4. Répartition géographique des caféiers

Le caféier requiert le climat chaud et humide des régions tropicales ou subtropicales. La culture du caféier trouve son terrain de prédilection dans la ceinture équatoriale délimitée par les 30^e parallèles Nord et Sud (**Figure II.02**). L'arbuste peut atteindre 6 à 8 m. A la floraison, les fleurs se disposent par groupes et donnent naissance à des fruits communément appelés cerise. Les cerises mesurent jusqu'à 8 mm de longueur et 10-25mm de diamètre. (**DURAND, 2012**).

Le Brésil et la Colombie sont les deux principaux pays producteurs mondiaux.

C'est pourtant une plante originaire d'Afrique tropicale et d'Afrique de l'Est, qui est aujourd'hui cultivée dans des endroits chauds parmi lesquels l'Amérique du Sud, l'Asie Tropicale et aujourd'hui encore en Afrique. Le caféier se cultive entre septembre et novembre.

L'espèce *Coffea arabica* provient des hauts plateaux de l'Ethiopie (1300 à 1900 mètres d'altitude), ce qui est une altitude favorable au développement de cette espèce.

Ainsi, l'espèce *Coffea arabica* est uniquement cultivée dans les zones d'altitude. On la retrouve en Afrique (Cameroun, Congo, Ethiopie, Kenya, Nyassaland, Rwanda et Tanzanie), en Amérique (Colombie, Costa Rica, Equateur, Guatemala, Honduras, Mexique, Nicaragua, Panama, Paraguay, Pérou, San Salvador, Venezuela), et en Asie (Inde, Indonésie, Laos, Vietnam, Yémen).

L'espèce *canephora*, quant à elle, est originaire du bassin du Congo.

Pour qu'elle puisse se développer, cette plante a besoin de chaleur et d'humidité. C'est pourquoi elle est aujourd'hui cultivée dans les zones de basse et moyenne altitudes. Ainsi, on la retrouve en Afrique (Angola, Côte d'Ivoire, Guinée, République centrafricaine), en Amérique du Sud notamment au Brésil mais également en Asie (Inde, Indonésie, Nouvelle-Calédonie, Philippines). (**HUYGHE, 2014**).

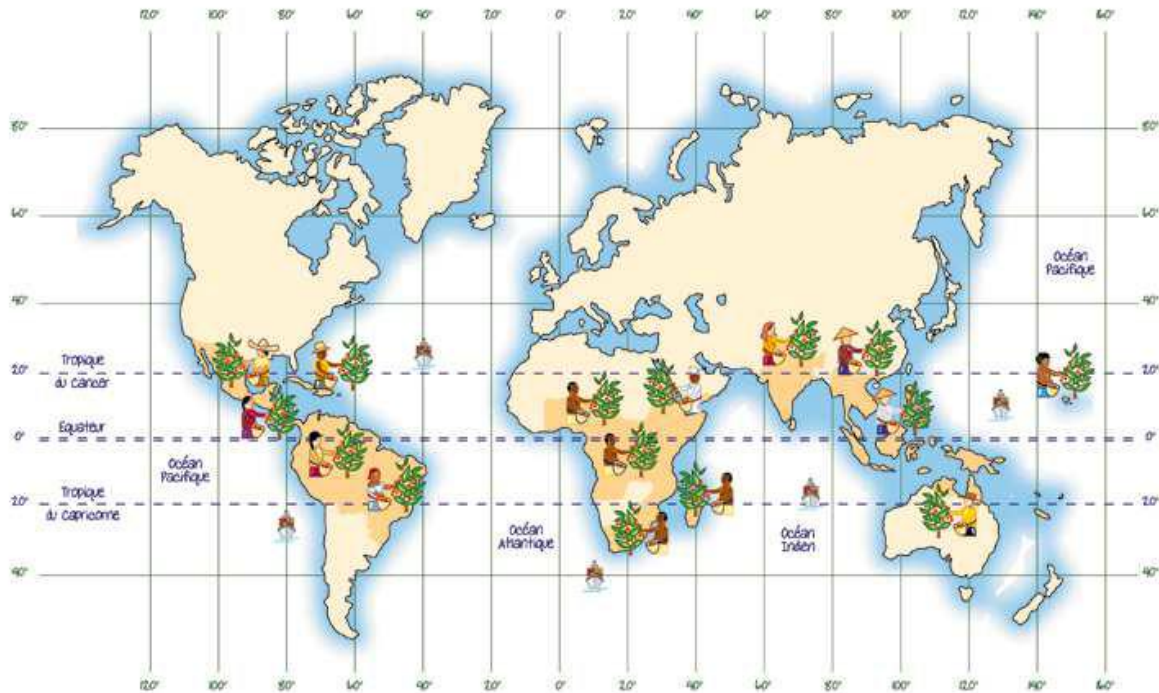


Figure II.02 : Répartition géographique de la culture du café (DURAND, 2012)

II.5. Production et consommation du café

D'après les estimations les plus récentes de l'organisation internationale du café, en 2020/ 2021, environ 166,346 millions de sacs de café de 60kg ont été consommés mondialement, c'est l'équivalent de 9,98 milliards kg, soit une légère augmentation par rapport aux 164 millions de sacs de l'année précédente.

Le Brésil est le plus grand producteur de café au monde avec 3804000000 tonnes de production par an, et le Vietnam arrive en deuxième position avec 1740000000 tonnes de production annuelle.

L'union européenne est le premier consommateur de café au monde par 2415060000 tonnes en 2020/2021 et l'États-Unis d'Amérique est en deuxième position par 1618920000 tonnes et en troisième position le Japon par 443160000 tonnes.

Quant aux pays arabes l'Algérie est le premier consommateur de café en 2020/2021 ayant importé 127860000 tonnes suivie de l'Arabie saoudite par 75180000 tonnes et le Maroc par 46800000 tonnes de café. (ICO, 2021).

D'après le graphique de la (Figure II.03), nous pouvons constater que le l'Amérique du sud représente la première région du monde concernant la production du café ; et l'Europe est en tête du classement pour celle de la consommation.

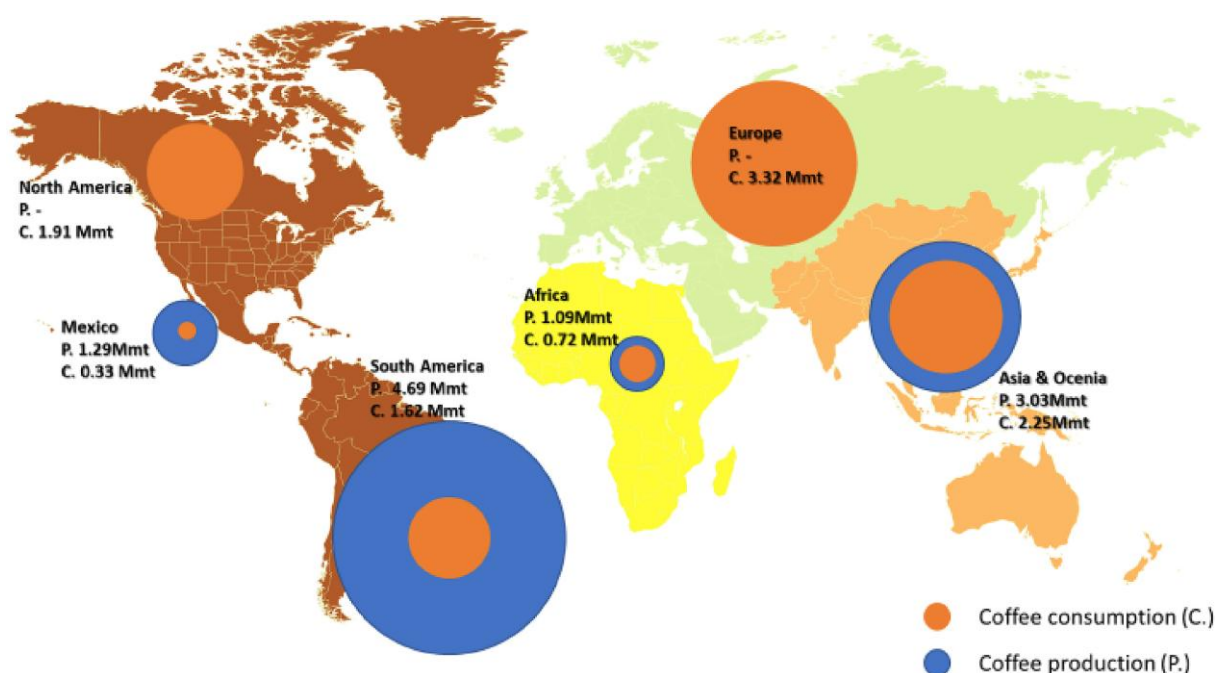


Figure II.03 : Distribution géographique de la production et de la consommation mondiale du café (Mmt : million de tonnes métriques) (BATTISTA *et al.* 2020)

Tableau .II.01: Importations et exportations de café dans le monde en 2020-2021(ICO., 2021).

Exportation	2020/2021	Importation	2020/2021
Pays exportateurs	50 666	Pays importateurs	115 680
Brésil	22 400	Union européenne	40 251
Indonésie	5 000	les États-Unis d'Amérique	26 982
Éthiopie	3 798	Japon	7 386
Philippines	3 312	Fédération Russe	4 681
Viet Nam	2 700	Canada	4 011
Mexique	2 420	République de Corée	2 513
Colombie	2 045	Australie	1 962
Venezuela	1 100	Algérie	2 131
Inde	1 485	Turquie	1 754
Thaïlande	1 415	Arabie Saoudite	1 253
Guatemala	403	Ukraine	1 379
République dominicaine	383	la Suisse	1 074
Madagascar	377	Norvège	924
Honduras	375	Maroc	780
Costa Rica	353	Taiwan	725
Haïti	341	Liban	452

Côte d'Ivoire	317	Afrique du Sud	655
Salvador	295	Egypte	1 279
Pérou	250	Argentine	644
Ouganda	263	Soudan	702
Autres	1634	Autres	14 144

II.6. Description morphologique des caféiers

Les caféiers sont des arbres ou des arbustes dont la hauteur varie de 1 à 2 mètres pour les espèces comme *C. humilis* et *C. heterocalyx*, jusqu'à 18 mètres pour les plus grandes comme *C. liberica*. Ils ont une architecture suivant le modèle de Roux c'est-à-dire que le tronc est monopodial, orthotrope et régulièrement ramifié de deux rameaux plagiotropes opposés sur chaque noeud du tronc. Ces rameaux latéraux sont les branches florifères et peuvent se ramifier en un 2ème voire 3ème axe plagiotrope. Leurs feuilles sont persistantes (sauf pour *C. racemosa*) simples et opposées, et ont une grande diversité de forme et de taille selon les espèces (**Figure II.04**).

Les inflorescences apparaissent à l'aisselle des feuilles des axes plagiotropes, sauf chez *C. macrocarpa* Rich. Où elles sont localisées à la base des feuilles de l'axe orthotrope et chez certaines espèces de Madagascar où elles peuvent être aussi terminales. Elles peuvent aussi émerger à partir d'anciennes cicatrices foliaires comme dans la série des *Verae*. (**ADLER, 2014**).

Les inflorescences sont uniflores chez certaines espèces comme par exemple *C. mauritiana* Lam., mais dans la grande majorité des cas elles forment une cyme pluriflore. Le nombre d'inflorescences par nœud et le nombre de fleurs par inflorescences montrent une grande diversité intraspécifique opposant, en Afrique, des espèces comme *C. pseudozanguebariae* avec 4,5 fleurs par noeud en moyenne à *C. canephora* montrant de véritables coussinets floraux (36 fleurs par noeud en moyenne) (**AKAFFOU et al., 2014**). Cette diversité est à associer avec l'importance relative des pollinisations anémophile et entomophile propre à chaque espèce. (**ADLER, 2014**).

Les fleurs sont tubuleuses et de couleur blanche, voire légèrement rosée dans certains cas lorsqu'elles se fanent (**Figure II.05**). Leur taille et le nombre de lobes (de 5 à 8) varient aussi entre espèces. (**ADLER, 2014**).

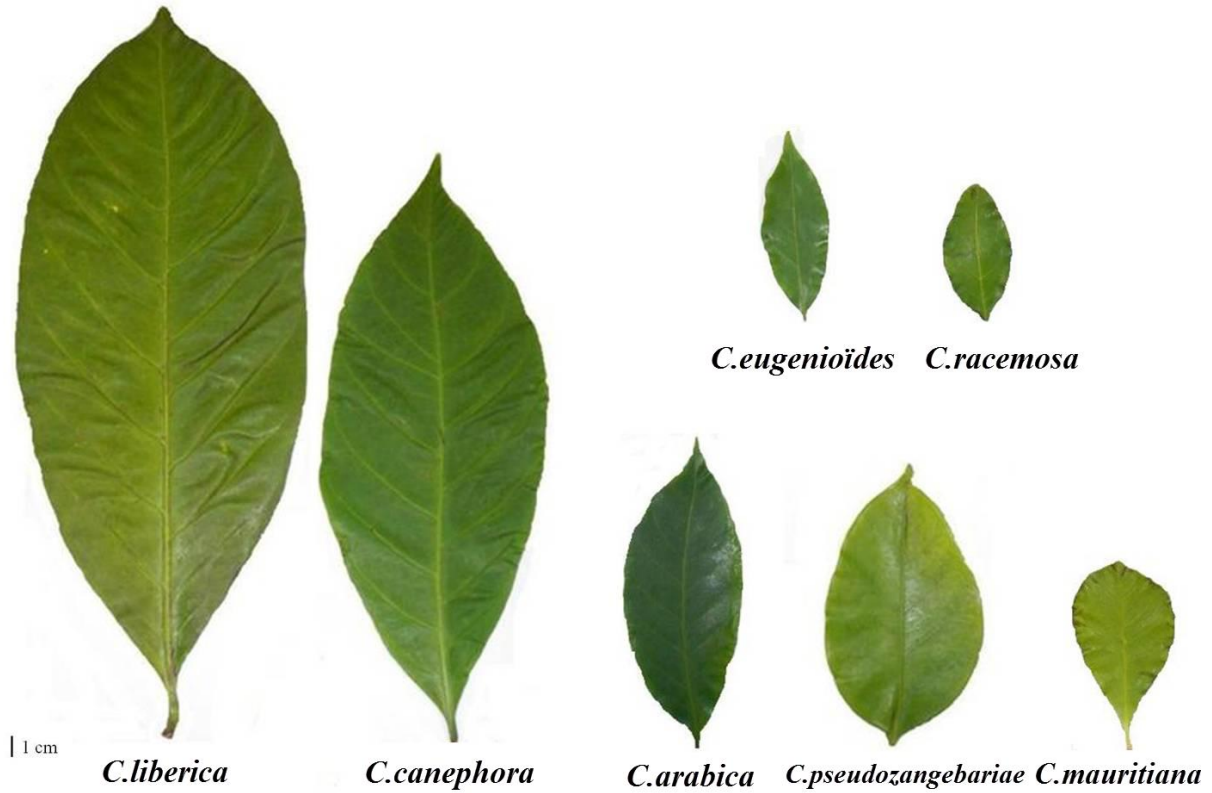


Figure II.04 : Feuilles de différentes espèces de caféiers (ADLER, 2014)



Figure II.05 : Fleurs de différentes espèces de caféiers (ADLER, 2014)

Le fruit du caféier, appelé aussi drupe ou cerise, est un faux fruit. Il est en effet formé de la composition de plusieurs organes de la fleur (principalement le réceptacle floral). Ceci est à opposer au vrai fruit où seul le pistil se transforme après la fécondation tandis que les autres parties de la fleur dégénèrent. Comme les pommes et les poires (ou drupes complexes), le péricarpe est le réceptacle floral et à l'opposé du pédoncule, il y a une petite cavité qui contient les restes des pièces florales (sépalés, étamines desséchées). Ces restes sont visibles chez des caféiers comme *C. heterocalyx*, voire chez certains génotypes de *C. arabica*. Le fruit est composé d'un exocarpe (ou épicarpe) changeant de couleur à maturité, d'un mésocarpe charnu et de deux graines accolées par leur face plane à invagination « cofféenne » et entourées d'un tégument fibreux appelé parche. Une grande variété de formes, de tailles et de couleurs (vert, jaune, orange, rouge, violet, noir, blanc) (**Figure II.06**) est répertoriée chez les différentes espèces. Les fruits rouges à maturité sont connus pour attirer les animaux diurnes comme les singes qui assurent alors la dispersion des graines. En revanche les fruits bleus à maturité verraient leur dispersion assurée par des animaux nocturnes comme les roussettes (ADLER, 2014).



Figure II.06 : Fruits de caféiers illustrant la diversité de forme et de couleur du péricarpe. De gauche à droite : *C. kapakata*, *C. arabica*, *C. pocsii* Bridson, *C. canephora* (ADLER, 2014)

II.7. Différences entre *C. arabica* et *C. canephora*

II. 7.1. *Coffea arabica* (70% de la production mondiale)

Ce sont les forêts tropicales éthiopiennes qui ont abrité les premiers *Coffea arabica* à des altitudes allant de 1600 à 2800 m. Au XIV^{ème} siècle, à l'origine de sa culture, *C. arabica* se trouve donc en condition ombragée, dans cette région où la température de l'air se caractérise par de faibles fluctuations saisonnières, atteignant en moyenne environ 20°C. Les

précipitations sont bien réparties, variant de 1600 à plus de 2000 mm, avec une saison sèche de 3-4 mois coïncidant avec les mois les plus frais. Dans ces conditions, l'espèce *C. arabica* semble très sensible aux variations de température. Ainsi, des températures supérieures à 23°C entraînent une accélération du développement et de la maturation des fruits qui se traduit par une perte de la qualité du café. L'exposition continue à des températures aussi élevées que 30°C entraîne non seulement une croissance réduite mais également des anomalies telles que le jaunissement des feuilles et la croissance de tumeurs à la base de la tige, alors qu'une température annuelle moyenne inférieure à 18°C réduit considérablement la croissance générale de l'arbre. *C. arabica* a été cultivé au moins durant cinq siècles au Yémen avant d'être propagé à travers le monde. Quelques pieds de *C. arabica* sont à l'origine des plantations actuelles de caféiers. En effet, au début du XVIIIème siècle, par le biais des échanges commerciaux hollandais et des campagnes de colonisation françaises, espagnoles et portugaises, quelques individus ont été introduits en Indonésie, en Amérique Latine et vers l'île Bourbon (actuellement appelée l'île de la Réunion) puis vers les régions actuellement productrices. Ces caféiers du Yémen ont ainsi permis la propagation de deux variétés : « Typica », qui a été le premier caféier cultivé en Asie et en Amérique latine et « Bourbon », qui est arrivée en Amérique du Sud en passant par l'île de La Réunion (ANTHONY *et al.*, 2002; ADLER, 2014).(VESTALYS, 2018).

II. 7.2. *Coffea canephora* (30% de la production mondiale)

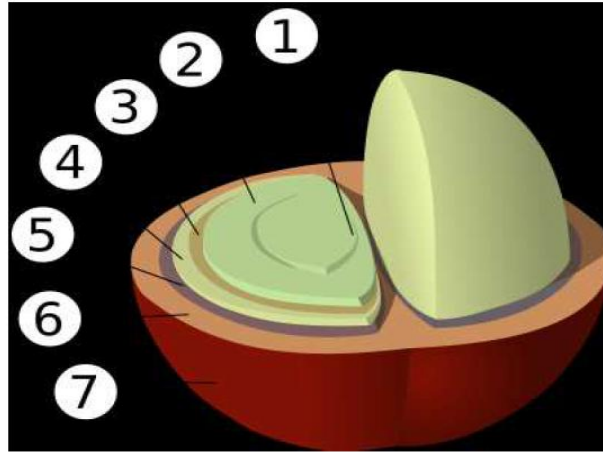
Coffea canephora est originaire des forêts africaines qui s'étendent du fleuve Congo jusqu'au lac Victoria en Ouganda. L'altitude de cette vaste région peut atteindre 1200 m en Ouganda et la température moyenne est comprise entre 24 et 26°C, sans grandes oscillations, avec des précipitations supérieures à 2000 mm réparties sur une période de 9 à 10 mois et avec une forte humidité de l'air. Les hautes températures ne sont pas favorables au développement de cette espèce de caféier, notamment lorsque l'air est sec. C'est au début du XXème siècle, suite à une attaque généralisée d'un champignon, *Hemileia vastatrix*, responsable de la rouille orangée dévastatrice des plantations d'Arabica, que sa culture a commencé, plus particulièrement en Afrique. (VESTALYS, 2018).

II. 8. Le café vert : le fruit

II. 8.1. Histologie de la fève de café vert

La cerise du café est classée dans les drupes, c'est-à-dire les fruits à mésocarpe charnu et à endocarpe ligneux. D'un point de vue morphologique, la drupe de café est un fruit ellipsoïdal (d'environ 1 x 2 cm) contenant deux noyaux bombés sur une face et plats sur l'autre. La prolifération cellulaire durant la phase d'accroissement du fruit reste très limitée

car l'épaisseur du mésocarpe n'excède jamais 2 mm. Au cours de la maturation, le fruit passe d'une couleur verte au rouge ou orange intense selon les espèces. (Figure II.07) présente la coupe d'une cerise de café.



1 : sillons centraux, 2 : grain de café (endosperme), 3 : peau du grain (tégument), 4 : parchemin (endocarpe), 5 : couche de pectine, 6 : pulpe : (mésocarpe), 7 : peau du fruit (exocarpe)

Figure II.07 : Structure du fruit et de la graine du caféier (DURAND, 2012)

II. 8. 1.1. Le mésocarpe externe

Le mésocarpe externe, souvent appelé pulpe, est composé de cellules parenchymateuses de petite taille à parois primaires et de diamètre croissant en allant vers l'intérieur du fruit. Les parois des cellules du mésocarpe externe de café sont compactes et denses lorsque le fruit est vert et après subissent une « fonte » ou amincissement des régions intercellulaires. Ce mécanisme appelé dégradation autolytique est responsable de la texture et de la succulence des fruits charnus (OUGUERRAM, 1989).

La composition chimique du mésocarpe externe (ou pulpe) varie selon la maturité et l'espèce des fruits analysés. La teneur en eau varie également selon le mode de traitement des fruits de 62 à 76% (DURAND, 2012).

II. 8. 1.2. Le mésocarpe interne

Le mésocarpe interne est une organisation tissulaire avec des cellules à parois fragiles et jointives de type primaire, riche en substance peptiques, il représente environ 20% de la matière fraîche et 55% de la matière sèche du fruit (DURAND, 2012).

II. 8. 1.3. L'endocarpe

L'endocarpe aussi appelé parche est un tissu secondaire lignifié d'environ 150 µm d'épaisseur. Sous la parche, une fine membrane appelée pellicule argentée (ou épiderme interne) recouvre deux graines de tissu parenchymateux de réserve portant un sillon central sur leur face plane (DURAND, 2012).

II. 9. Composition chimique du café vert

Les composés biochimiques rencontrés dans les grains verts sont les glucides, les lipides, les protéines, les dérivés azotés non protéiques, les acides organiques et les substances minérales. (Tableau II.02) illustre les données chiffrées relatives aux espèces *Coffea arabica* et *Coffea canephora*. La plupart des composés biochimiques du café vert sont à l'origine des arômes caractéristiques du café, après torréfaction, et sont dénommés « précurseurs d'arômes » (DURAND, 2012).

Tableau II.02 : Composition chimique des graines du café vert Robusta et Arabica (MUSSATTO et al., 2011).

Composant	Arabica	Robusta
Glucides solubles	9 – 12.5	6 – 11.5
Monosaccharides	0.2 – 0.5	
Oligosaccharides	6 – 9 3 – 7	
Polysaccharides	3 – 4	
Polysaccharides insolubles	46 – 53	34 – 44
Hémicellulose	46 – 53	3 – 4
Cellulose, β (1-4) mannanes et phénols	41 – 43	32 – 40
Acides volatils	0.1	
Acides aliphatiques non volatils	2–2.9	1.3–2.2
Acide chlorogénique	6.7–9.2	7.1–12.1
Lignine	1 – 3	
Lipides	15 – 18	8 – 12
Cire	0.2 – 0.3	
Huiles	7.7 – 17.7	
composés azotés	11 – 15	
Acides aminés libres	0.2–0.8	
Protéines	8.5–12	
Caféine	0.8–1.4	1.7–4.0
Trigonelline	0.6–1.2	0.3–0.9
Minéraux	3–5.4	

La plupart des composés biochimiques du café vert sont à l'origine des arômes caractéristiques du café, après torréfaction, et sont dénommés « précurseurs d'arômes » (DURAND, 2012).

II. 9.1. Les Acides chlorogéniques (ACG)

Les acides chlorogéniques ou esters d'acides quinqués constituent les plus importants composés phénoliques du métabolisme secondaire dans le règne végétal. Les acides chlorogéniques sont des précurseurs de la lignine. Ils participent au contrôle de la germination et de la croissance cellulaire. Ils sont impliqués également dans les mécanismes de défense contre les phytopathogènes (DURAND, 2012).

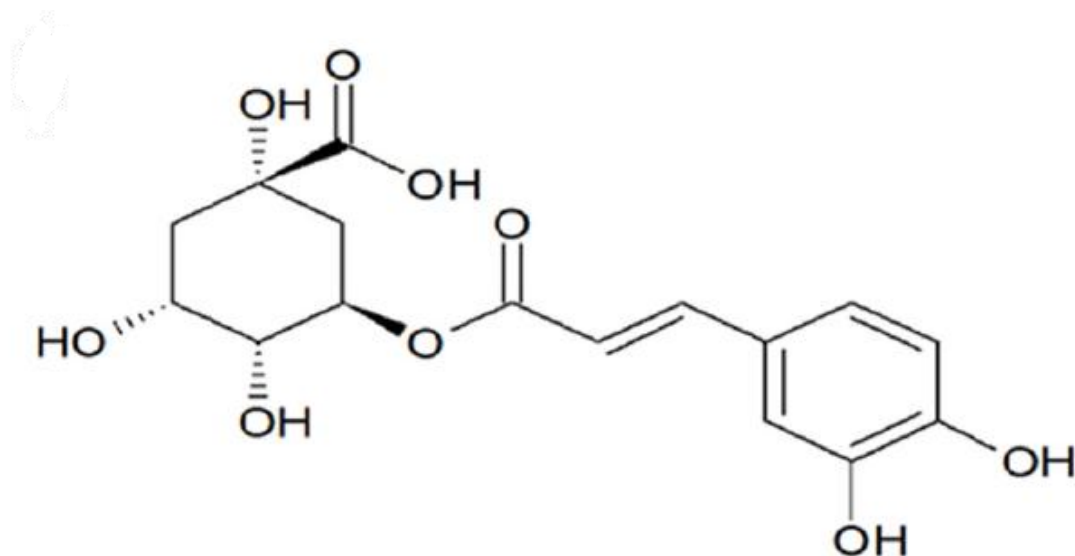


Figure II.08 : Structure chimique de l'acide chlorogénique
(SANTOS *et al.*, 2021)

II. 9.2. La caféine (triméthyl-1, 3,7 xanthine)

La caféine est l'alcaloïde majoritaire du café. Composé très stable, il est connu pour être un stimulant du système nerveux central. La caféine confère aux plantes une résistance aux attaques d'éventuels pathogènes. Ainsi, elle possède un effet inhibiteur de croissance fongique (DURAND, 2012).

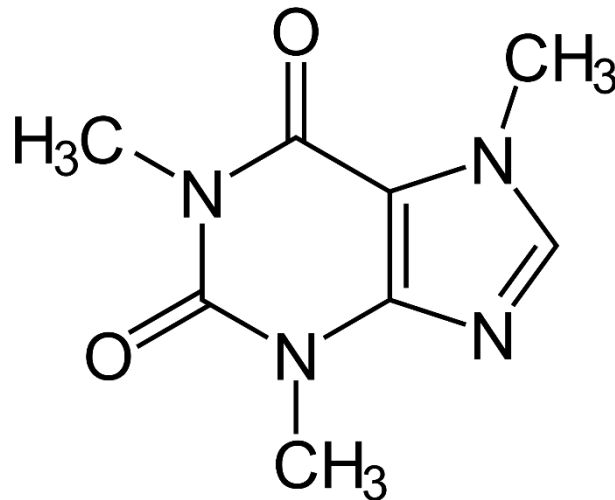


Figure II.09 : Molécule de la caféine (BONNIN, 2016)

II. 9.3. Les glucides

Une fois séché, le grain vert contient 55 % en MS de polysaccharides totaux. Ils constituent la majeure partie des glucides. Pour *C.arabica*, le saccharose est le sucre majoritaire dans le café vert, il représente 98 % des polysaccharides totaux. Ce diholoside est formé d'une molécule de glucose et d'une molécule de fructose relié par une liaison osidique. Cependant d'autres sucres, de faibles poids sont également retrouvés à l'état de traces, tels que le glucose et le fructose.

Des composés aromatiques se développent grâce aux réactions de Maillard. La torréfaction entraîne la dégradation des sucres, permettant la formation de furannes. Les notes aromatiques formées sont « terreux », « Caramel », « noisette », « grillé » (DURAND, 2012).

II. 9.4. La trigonelline

Ce composé azoté, présent à hauteur de 0,6 à 1.2% dans le café vert, se dégrade pour moitié en acide nicotinique lors de la torréfaction.

Les composés aromatiques formés à partir de la trigonelline, lors de la torréfaction, sont des dérivés de la pyridine dont les notes aromatiques sont « vert », « grillé », « terreux », « amer », « brulée » (DURAND, 2012).

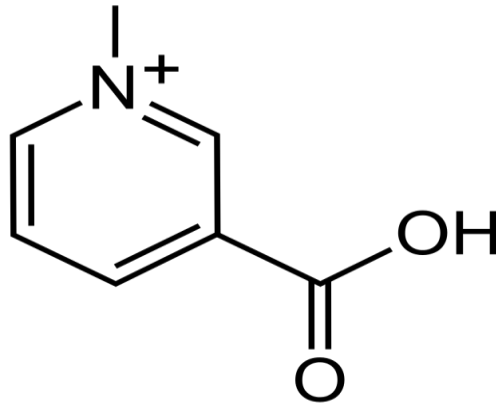


Figure II.10 : Molécule de la trigonelline (MEYER, 2021)

II. 9.5. Les lipides

Les lipides représentent de 10 à 20 % de la matière sèche des grains verts de café. Une fraction majoritaire est constituée des composés saponifiables (acides gras et dérivés) ou non (stéroïdes et triterpènes, tocophérols) ou entrant dans la composition des cires. L'hydrolyse de leurs liaisons esters entre acides gras et glycérol par des bases donnent des savons (sels de Na⁺ ou K⁺ des acides gras) (DURAND, 2012).

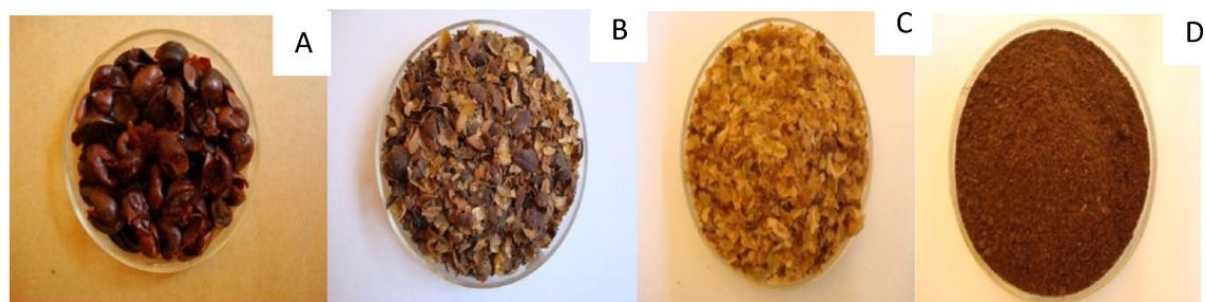
II.10. La torréfaction

L'opération de torréfaction consiste à chauffer les grains de café vert à une température comprise entre 160°C et 260°C. C'est au cours de la torréfaction que le café développe la majeure partie de ses propriétés organoleptiques. Le processus de la torréfaction consiste à griller le grain vert sous l'effet du couple temps-température. Physiquement, le grain change de couleur, il passe du vert au marron. Il peut gonfler jusqu'à 70 %, perdre jusqu'à 20% en poids. Chimiquement, la torréfaction est le siège de réactions de pyrolyse et de brunissement non enzymatique encore appelé réaction de Maillard. Cette réaction se produit entre les acides aminés et les glucides sous l'action de la chaleur ; ces derniers se combinent pour former des composés carbonylés, des mélanoidines et des composés volatils et aromatiques *idem*.

II.11. Déchets issus de la récolte et de la consommation du café

Le café est le deuxième plus grand produit commercialisé dans le monde et génère une grande quantité de sous-produits et de résidus pendant le traitement du fruit à la tasse. Le traitement industriel des cerises de café consiste à séparer la poudre de café en enlevant la coquille et la partie mucilagineuse des cerises. En fonction de la méthode de traitement des

cerises de café, c'est-à-dire par voie humide ou sèche, on obtient des résidus solides de torréfaction et de brassage tels que la pulpe, la pellicule argentée et la pâte (**Figure II.08**). Les cosses/écorces/pulpe de café, comprenant près de 45% de cerise, sont les principaux sous-produits de l'industrie du café. Ils sont utilisés à diverses fins, notamment l'extraction de la caféine et des polyphénols car ils sont riches en nutriments (**Tableau II.03**). (**MURTHY ET NAIDU., 2012.**)



A. Pulpe de café

B. Cerise de café

C. Pellicule argentée

D. Marc de café

Figure II.11 : Sous-produits du café obtenus lors de la transformation du café (MURTHY et NAIDU, 2012)

Tableau II.03 : Composition chimique des sous-produits du café brut et transformé (MURTHY ET NAIDU., 2012)

Paramètres (%)	Pulpe de café	Cerise de café	Pellicule argentée	Marc de café
Cellulose	63,0 ± 2,5	43,0 ± 8,0	17,8 ± 6,0	8,6 ± 1,8
Hémicellulose	2,3 ± 1,0	7,0 ± 3,0	13,1 ± 9,0	36,7 ± 5,0
Protéine	11,5 ± 2,0	8,0 ± 5,0	18,6 ± 4,0	13,6 ± 3,8
Graisse	2,0 ± 2,6	0,5 ± 5,0	2,2 ± 1,9	ND
Fibre totales	60,5 ± 2,9	24 ± 5,9	62,4 ± 2,5	ND
Polyphénols totaux	1,5 ± 1,5	0,8 ± 5,0	1,0 ± 2,0	1,5 ± 1,0
Sucres totaux	14,4 ± 09	58,0 ± 20,0	6,65 ± 10	8,5 ± 1,2
Substance pectique	6,5 ± 1,0	1,6 ± 1,2	0,02 ± 1,0	0,01 ± 0,005
Lignine	17,5 ± 2,2	9,0 ± 1,6	1,0 ± 2,0	0,05 ± 0,05
Tanins	3,0 ± 5,0	5,0 ± 2,0	0,02 ± 0,1	0,02 ± 0,1
Acide chlorogénique	2,4 ± 1,0	2,5 ± 0,6	3,0 ± 0,5	2,3 ± 1,0
Caféine	1,5 ± 1,0	1,0 ± 0,5	0,03 ± 0,6	0,02 ± 0,1

II.11. 1. Pulpe de café

La pulpe de café est le premier sous-produit obtenu lors du traitement et représente 29% en poids sec de la baie entière. La pulpe de café est obtenue lors du traitement humide du café et pour 2 tonnes de café produites, 1 tonne de pulpe de café est obtenue. La pulpe de café est essentiellement riche en glucides, protéines et minéraux (notamment en potassium) et contient également des quantités appréciables de tanins, de polyphénols et de caféine. Les composants organiques présents dans la pulpe de café (poids sec) comprennent les tanins 1,80–8,56%, les substances pectiques totales 6,5%, les sucres réducteurs 12,4%, les sucres non réducteurs 2,0%, la caféine 1,3%, l'acide chlorogénique 2,6% et l'acide caféique total 1,6% *idem*.

II.11. 2. Cerise de café

Les cosses de cerises de café sont obtenues lorsque les baies de café sont traitées par méthode sèche. La cerise de café renferme les grains de café et représente environ 12% de la baie sur la base du poids sec. Environ 0,18 tonne de cerise est produite à partir d'une tonne de fruits de café. Les cosses de café composent 15,0% d'humidité, 5,4% de cendres, 7,0% de protéines, 0,3% de lipides et 72,3% de glucides. La cerise de café contient 24,5% de cellulose, 29,7% d'hémicelluloses, 23,7% de lignine et 6,2% de cendres *idem*.

II.11. 3. Pellicule argentée

La peau d'argent de café est un tégument de grain de café obtenu comme sous-produit du processus de torréfaction. C'est un résidu à forte concentration de fibres alimentaires solubles (86% du total des fibres alimentaires) et ayant une capacité antioxydante élevée, probablement en raison de la concentration de composés phénoliques, ainsi que de la présence d'autres composés formés par la réaction de Maillard tels que les mélanoïdines pendant le processus de torréfaction. Les principaux composants de ces tissus fibreux sont la cellulose et l'hémicellulose. Le glucose, le xylose, le galactose, le mannose et l'arabinose sont les monosaccharides présents dans la peau du café argenté avec les protéines. *Idem*.

II.11. 4. Marc de café

Près de 50% du café mondial produit est transformé pour la préparation de café soluble. En moyenne, une tonne de café vert génère environ 650 kg de marc de café, et environ 2 kg de marc de café humide sont obtenus pour chaque kg de café soluble produit. Le marc de café est plus riche en sucres et contenant du mannose et du galactose ainsi qu'une fraction significative de protéines. La composition chimique varie d'une plante à l'autre et dans différentes parties de la même plante. Il varie également au sein des plantes de différents emplacements géographiques, âges, climat et conditions du sol. La connaissance des

propriétés physiques et chimiques mènera à une meilleure compréhension de l'application du café. *Idem*.

II. 12. Avantages et inconvénients du café

Le café est la deuxième boisson la plus courante au monde après le thé, et tout effet du café est un problème important de santé nutritionnelle. Le café contient environ 2000 produits chimiques en plus de la caféine, le composant le plus connu de la boisson. Ceux-ci comprennent de nombreux composés bioactifs ayant des effets potentiels sur la santé. La quantité de caféine et d'autres composants du café dans la boisson finale est variable et dépend du type de poudre de café, de la méthode d'infusion, de la préparation de la boisson et de la taille de la tasse (CAVALLI AND TAVANI, 2016).

Cette variation complique notre compréhension des effets du café sur la santé. La consommation de café était souvent associée à des effets défavorables sur la santé, mais certains d'entre eux n'ont pas été confirmés par des preuves épidémiologiques plus récentes. (CAVALLI AND TAVANI, 2016).

La liste des substances chimiques contenues dans le café est loin d'être définie et certaines substances sont contenues dans certaines variétés de graines et pas dans d'autres. Cependant, il existe certaines caractéristiques chimiques de base communes à tous les types de café après torréfaction (CAVALLI AND TAVANI, 2016).

La caféine (1,3,7-triméthylxanthine) est un alcaloïde présent dans quelques boissons et aliments en dehors du café. Il agit comme un antagoniste compétitif des récepteurs de l'adénosine A₁ et A_{2A} et a une grande variété d'effets physiologiques (Tableau II.04). (CAVALLI AND TAVANI, 2016).

Tableau II.04 : Principaux effets physiologiques de la caféine (CAVALLI AND TAVANI, 2016)

Système corporel	Action pharmacologique de la caféine
Système nerveux central	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la fatigue, temps de réaction • Augmentation de la vigilance, de l'énergie, de l'humeur, de l'anxiété, de l'insomnie
Système respiratoire	<ul style="list-style-type: none"> • Stimulation du centre respiratoire <ul style="list-style-type: none"> • Bronchodilatation
Système cardiovasculaire	<ul style="list-style-type: none"> • Légère augmentation à court terme de la pression artérielle • Augmentation de la fréquence cardiaque
Système urinaire	<ul style="list-style-type: none"> • Diurèse légère

Tube digestif	<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'estomac : augmentation de la sécrétion de HCl et de pepsine • Augmentation de la motilité gastro-intestinale • Augmentation de la sécrétion d'acides biliaires
Tissu adipeux	<ul style="list-style-type: none"> • Stimulation de la lipolyse

Le tableau suivant résume quelque impacts bénéfiques ou non de la consommation du café (CAVALLI AND TAVANI, 2016).

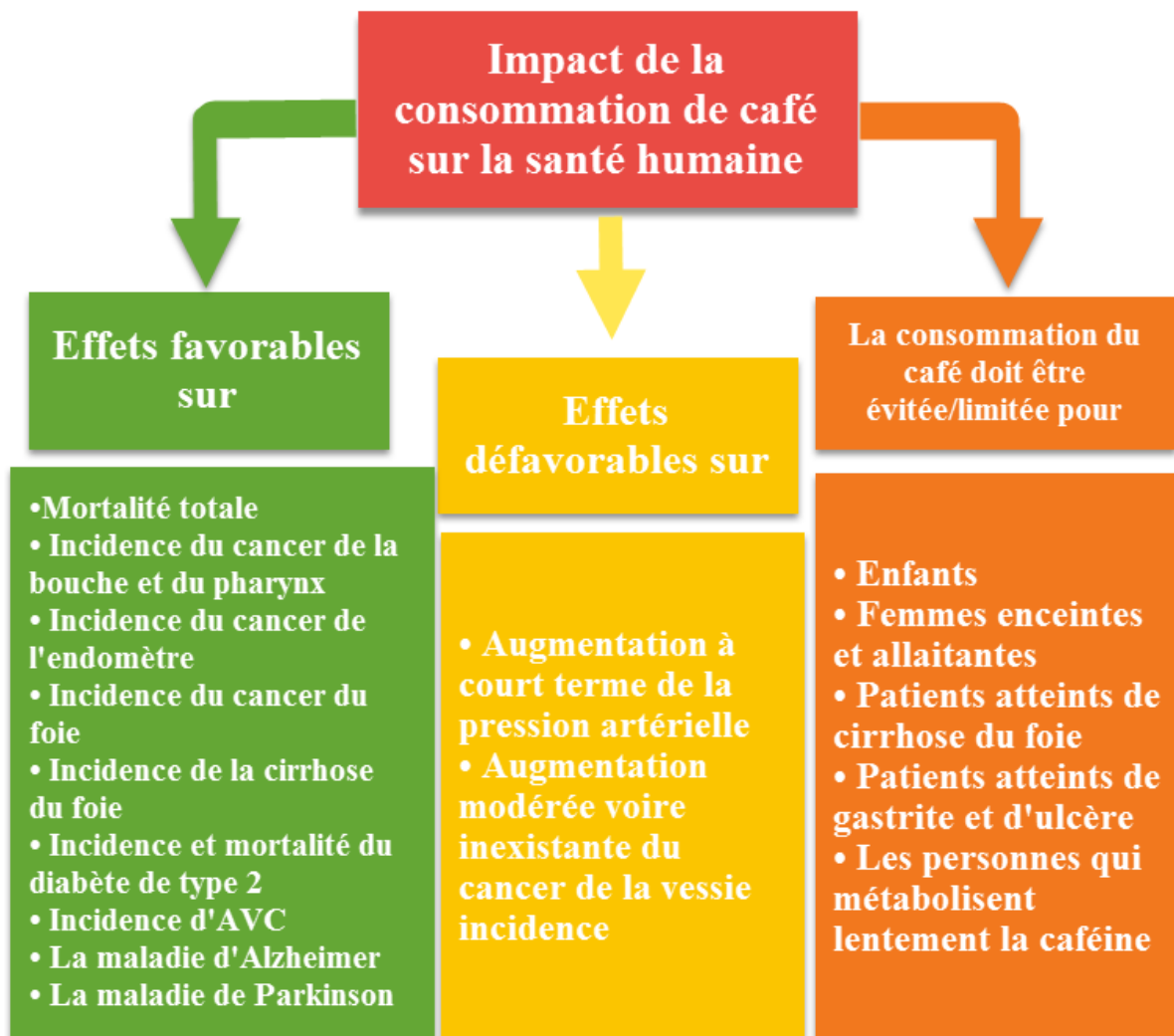


Figure II.12 : Impact de la consommation de café sur la santé humaine (CAVALLI AND TAVANI, 2016)

En conclusion :

1. Le café contient de nombreux produits chimiques bioactifs, notamment de la caféine, des diterpènes, des minéraux, des acides et des esters, ainsi que des composés phénoliques, dont beaucoup sont des antioxydants.
2. Une consommation modérée de café diminue légèrement la mortalité totale, bien que la causalité de cette association soit débattue.
3. Le café augmente légèrement la tension artérielle, diminue l'incidence du diabète et peut légèrement diminuer le risque de maladie cardiovasculaire, y compris d'accident vasculaire cérébral. Cependant, on ne peut exclure la possibilité que la causalité inverse soit dans une certaine mesure responsable de ces observations. Chez les buveurs non/occasionnels, le café dans la première heure après l'ingestion peut déclencher un infarctus aigu du myocarde et un accident vasculaire cérébral.
4. Le café n'augmente pas le risque total de cancer, mais il diminue l'incidence des cancers de la bouche et du pharynx, du foie et de l'endomètre, tandis que la relation avec le cancer de la vessie est encore débattue.
5. Le café n'est pas lié à l'ostéoporose et peut réduire le risque de troubles cognitifs et de maladie de Parkinson, bien que la causalité soit encore débattue. 6. La consommation de café doit être réduite chez les faibles métaboliseurs de caféine et chez les patients atteints de cirrhose, de gastrite et d'ulcère. La consommation de café doit être minimisée chez les enfants, les femmes enceintes et allaitantes. (**CAVALLI et TAVANI, 2016**).

II.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier lieu une revue bibliographique non exhaustive de la botanique du caféier, et en deuxième lieu nous avons dressé un inventaire tiré des études réalisées sur la composition biochimique du café et celle des déchets engendrés par sa production, sa transformation et sa consommation.

Les caféiers sont des arbres ou des arbustes endémiques des régions intertropicales, appartenant à la famille des Rubiacées et originaires des régions tropicales d'Afrique et d'Asie.

Parmi les espèces de ce fruit, .seulement deux espèces sont cultivées de manière significative, *Coffea arabica* L. et *Coffea canephora*.

La production et la consommation de ce produit ne cessent d'augmenter à travers le monde ; et d'après les statistiques récentes, la plus grande production mondiale de café, de l'ordre de 60% est couverte par le café Arabica (*Coffea arabica*).

Le café contient environ 2000 produits chimiques en plus de la caféine, ces composés bioactifs ont des effets potentiels sur la santé ; la consommation du café a des effets favorables et déformables ; et il est conseillé de le consommer modérément.

La production, ainsi que la transformation et la consommation de boisson engendrent des résidus et des déchets qu'il faut impérativement traiter et valoriser.

La récolte, la transformation, ainsi que la consommation du café engendrent des résidus et des déchets qu'il faut impérativement traiter et valoriser, car ils ont un impact écologique important ; La cerise de café, la pulpe de café, la pellicule argentée et le marc de café figurent parmi les déchets les plus importants.

D'après la composition chimique du marc de café, nous pouvons constater qu'il recèle des molécules à très fort potentiel comme les polyphénols, tanins, caféine pectine..., ces biomolécules après extraction peuvent trouver des applications dans divers secteurs en plus de du domaine alimentaire.

Liste des références bibliographiques

1. **ADLER S., 2014** - *Impacts histo-morphologiques et biochimiques de la mutation laurina sur les graines et les plantules de Coffea arabica L.* Thèse de Doctorat, Univ. de la Réunion, la Réunion, 165 p.
2. **AKAFFOU D., KONATE I., SIÉ R., PONCET V., ZORO I., KELI J., LEGNATE H., ET AL., 2014** - Flowering phenology and yield-related traits in an interspecific cross between *Coffea pseudozanguebariae* Bridson and *C. canephora* Pierre. *Australian Journal of Crop Science.*, 8(9): 1272–1280.
3. **ANTHONY F., COMBES C., ASTORGA C., BERTRAND B., GRAZIOSI G. ET LASHERMES P., 2002** - The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theoretical and Applied Genetics.*, 104(5): 894–900.
4. **BATTISTA F., BARAMPOUTI E.M., MAI S., BOLZONELLA D., MALAMIS D., MOUSTAKAS K. ET MARIA LOIZIDOU., 2020** - Added-value molecules recovery and biofuels production from spent coffee grounds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 131: 110007.
5. **BONNIN A.L., 2016** - *autour du café* .thèse de doctorat, UNIV. D'Angers, France, 211p.
6. **CAVALLI L., AND TAVANI A., 2016** - *Coffee Consumption and Its Impact on Health*.pp. 29-44 cité par Wilson T., Temple N.J. - *Beverage Impacts on Health and Nutrition*.Ed. Springer International Publishing., Switzerland, 2016, 406 p.
7. **DAGLIA M., PAPETTI A., GREGOTTI C., BERTE F. ET GAZZANI G. 2000** - In vitro antioxidant and ex vivo protective activities of green and roasted coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.*, 48:1449–54.
8. **DAVIS A.P., TOSH J., RUCH N. et FAY M.F., 2011** - Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. *Botanical journal of the Linnean Society.*, 167: 357–377.
9. **HUYGHE ., 2014** - *Bienfaits et limites de la consommation de caféine*. Thèse de Doctorat, Univ. Lille, France, 178p.
10. **JESZKA-SKOWRON M., ZGOŁAGRZES'KOWIAK A. ET GRZES'KOWIAK T., 2015**- Analytical methods applied for the characterization and the determination of bioactive compounds in coffee. *Eur Food Res Technol*, 240: 19–31.
11. **MEYER C.** *Dictionnaire des Sciences Animales* [en ligne]. Créé en 2021 [<http://dico-sciences-animales.cirad.fr>], (consulté le 04 octobre 2021).

12. **MURTHY P. S. ET NAIDU M., 2012-** Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling.*, 66: 45-5.
13. **MUSSATTO S.I., MACHADO E.M.S., MARTINS S. ET TEIXEIRA J.A., 2011 -** Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food Bioproc. Tech.*, 4: 661–672.
14. **NOËL DURAND., 2012 -** *Dynamique des populations microbiennes au cours du traitement post récolte du café et relations interspécifiques entre souches ochratoxinogènes.* Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier, France, 240p.
15. **ORGANISATION INTERNATIONALE DU CAFÉ.** (Page consultée le 11 septembre 2021), Adresse URL : <http://www.ico.org/>
16. **OUGUERRAM A., 1989 -** Formation and Digestion of the Storage Cell-Wall at Mannan of Coffee (*Coffea-Arabica L*). *Annales Des Sciences Naturelles-Botanique Et Biologie Vegetale* .,10: 111-133.
17. **POHL P., EWELINA STELMACH., MAJA WELNA .AND ANNA SZYMCZYCHA-MADEJA., 2013-** Determination of the Elemental Composition of Coffee Using Instrumental Methods. *Food Anal. Methods.*, 6:598–613.
18. **SANTOS E.M., DE MACEDO L.M., TUNDISI L.L., ATAIDE J.A., CAMARGO G.A., ALVES R.C., OLIVEIRA M.B.P.P. ET MAZZOLA P.G., 2021 -** Coffee by-products in topical formulations: A review. *Trends in Food Science & Technology.*, 111: 280–291.
19. **SCHWANKNER J., 2019 -** *analyse de la durabilité du café : production et consommation en Amérique.* Essai pour l’obtention du grade de maîtrise en environnement. univ. De sherbrooke, Canada, 84p
20. **VESTALYS I.R., 2018 -** *Recherche de marqueurs biochimiques et génétiques de l’adaptation des caféiers cultivés aux variations climatiques.* Thèse de Doctorat, Univ. D’Antananarivo, Madagascar ,200p.

An orange border with rounded corners and a scroll-like effect on the left and right sides, framing the text.

Chapitre III : Valorisation du marc de café

III. 1. Introduction

Le marc de café usé (MC) est un déchet résultant de la production de café instantané et de l'infusion de café (KOVALCIK *et al.*, 2018).

En 2019-2020, la production mondiale de café a atteint 169,34 millions de sacs de 60 kg et la consommation a été estimée à 168,39 millions de sacs. En conséquence, des alternatives écologiquement durables pour soutenir sa conversion systématique en l'un ou l'autre des produits sont recommandées dans le monde entier. (ATABANI *et al.*., 2022).

Le café est le deuxième produit le plus échangé après le pétrole. Sa production, sa transformation et sa consommation génèrent d'énormes quantités de résidus. Le déchet du marc de café suscite particulièrement un intérêt croissant pour les raisons suivantes :

- Ils contiennent un grand nombre de composés organiques (plus de 1000 composants individuels) qui peuvent être classés en glucides, protéines, lipides, minéraux, composés azotés non protéiques et phénoliques :
- Leur granulométrie permet une élimination rapide des substances respectives de la matrice par un solvant approprié ;
- Ce sont des déchets disponibles en quantité énorme (6 millions de tonnes par an) et à bas prix. (PESHEVA *et al.*, 2018).

L'objectif de ce chapitre est de dresser un inventaire bibliographique non exhaustif des propriétés et des caractéristiques du marc de café, déchet issu de la consommation du café.

Ce chapitre est composé de deux parties :

- ❖ La première partie inclut la composition chimique et les propriétés physicochimiques du marc de café révélées par des études expérimentales.
- ❖ La deuxième partie est consacrée aux molécules actives qui peuvent être extraites de ce résidu, ainsi que les applications réalisées dans différents secteurs d'après les publications scientifiques.

III.2. Traitement du café

Les voies de traitement peuvent être classées comme « voie sèche » lorsque le produit est séché directement après le lavage et l'élimination des impuretés (**Figure III.01**) ; et en tant que « voie semi-humide » et « voie humide » lorsque les fruits épluchés et/ou dépulés sont séchés, respectivement, et à la fois dans les étapes d'élimination de la peau et de l'élimination de la pulpe, de l'eau est utilisée (**CAMPOS *et al.*, 2021**)

Les baies de café sont traitées soit par voie sèche, soit par voie humide, la première étant adoptée principalement (environ 95 %) pour *C. arabica* au Brésil, en Éthiopie, en Haïti, au Paraguay, en partie en Inde et en Équateur., presque totalement pour *G. robusta* partout. Indépendamment de l'espèce ou du cultivar, le traitement par voie humide est couramment utilisé au Costa Rica, en Colombie, au Guatemala, au Pérou, en Bolivie et en Équateur. Dans le processus à sec, les cerises de café sont séchées à environ 10-11% d'humidité. Le séchage peut être effectué par des méthodes naturelles ou artificielles. Ensuite, les grains de café sont séparés des couches de couverture (peau, pulpe et parchemin) dans une décortiqueuse. Les résidus solides générés par le décorticage sont appelés cosses de café. Dans le procédé humide, le séchage n'est pas nécessaire. La peau et la pulpe sont enlevées mécaniquement, générant un résidu solide appelé pulpe de café. Ensuite, les fèves sont fermentées pour éliminer la couche de pulpe restante ou séchées directement à 12% d'humidité. Enfin les fèves sont décortiquées pour enlever le parchemin (**CAMPOS *et al.*, 2021**).

Au cours de la première étape du traitement à sec, les déchets solides générés sont les cosses et les pulpes de café et les grains de café de mauvaise qualité ou défectueux. La transformation secondaire conduit à la production de café torréfié et de café soluble. (**CAMPOS *et al.*, 2021**)

Le principal résidu solide généré au cours de cette étape est représenté par le marc de café épuisé provenant de la production de café soluble. En raison des quantités élevées générées au cours des deux étapes, ces résidus solides (c. le type de résidu. Les cosses de café, formées par la peau externe sèche, la pulpe et le parchemin, sont probablement le principal résidu de la transformation des baies de café : pour chaque tonne de grains de café produite, env. une tonne d'enveloppes est générée lors du traitement à sec, env. deux tonnes lors du traitement par voie humide, en fonction de la quantité d'eau ajoutée. Les grains défectueux représentent plus de 50 % des grains de café consommés, tandis que le MC est produit à raison de 1,5 tonne (25 % d'humidité) pour chaque tonne de café soluble. Ce résidu solide présente un problème d'élimination supplémentaire, car il peut être utilisé pour falsifier du café torréfié et moulu, étant pratiquement impossible à détecter. (**CAMPOS *et al.*, 2021**).

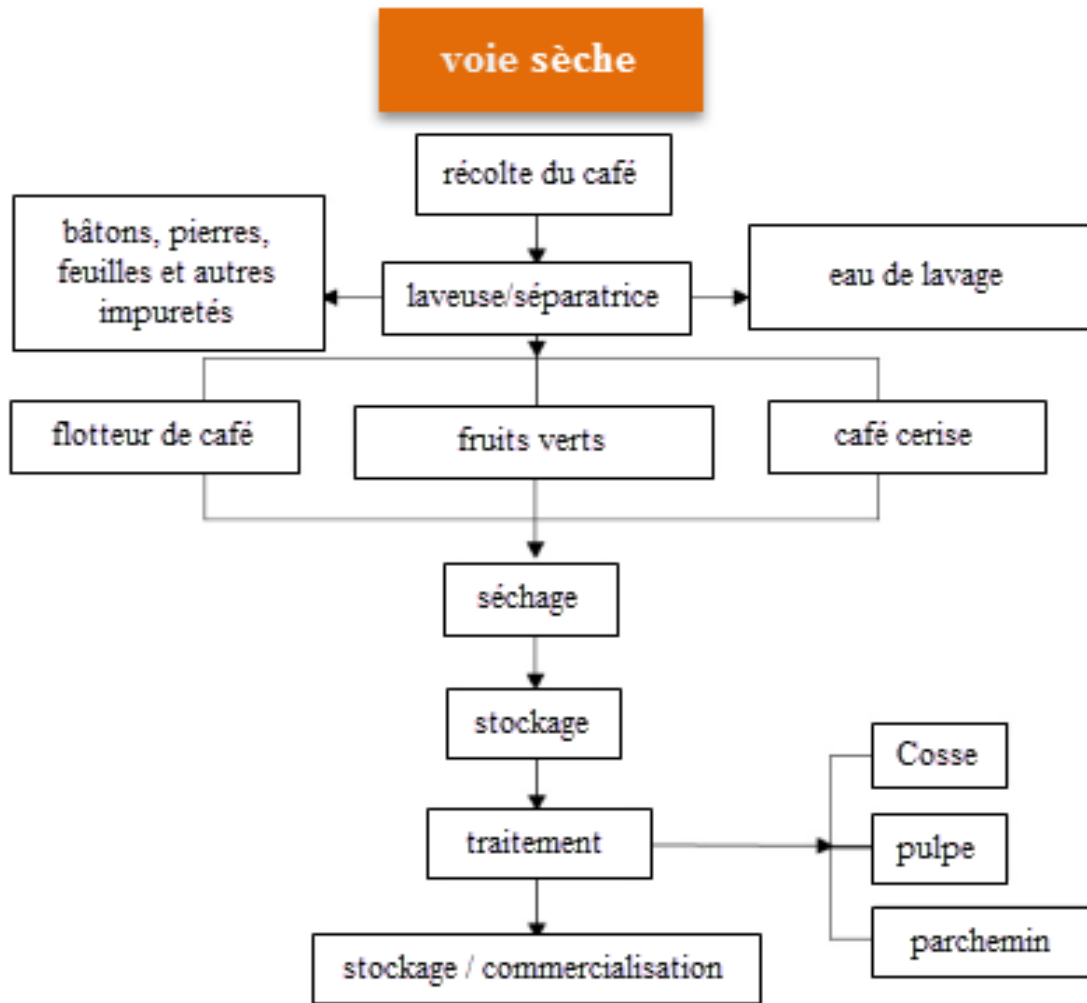


Figure III.01 : Étapes de traitement du processus à sec. (CAMPOS *et al.*, 2021).

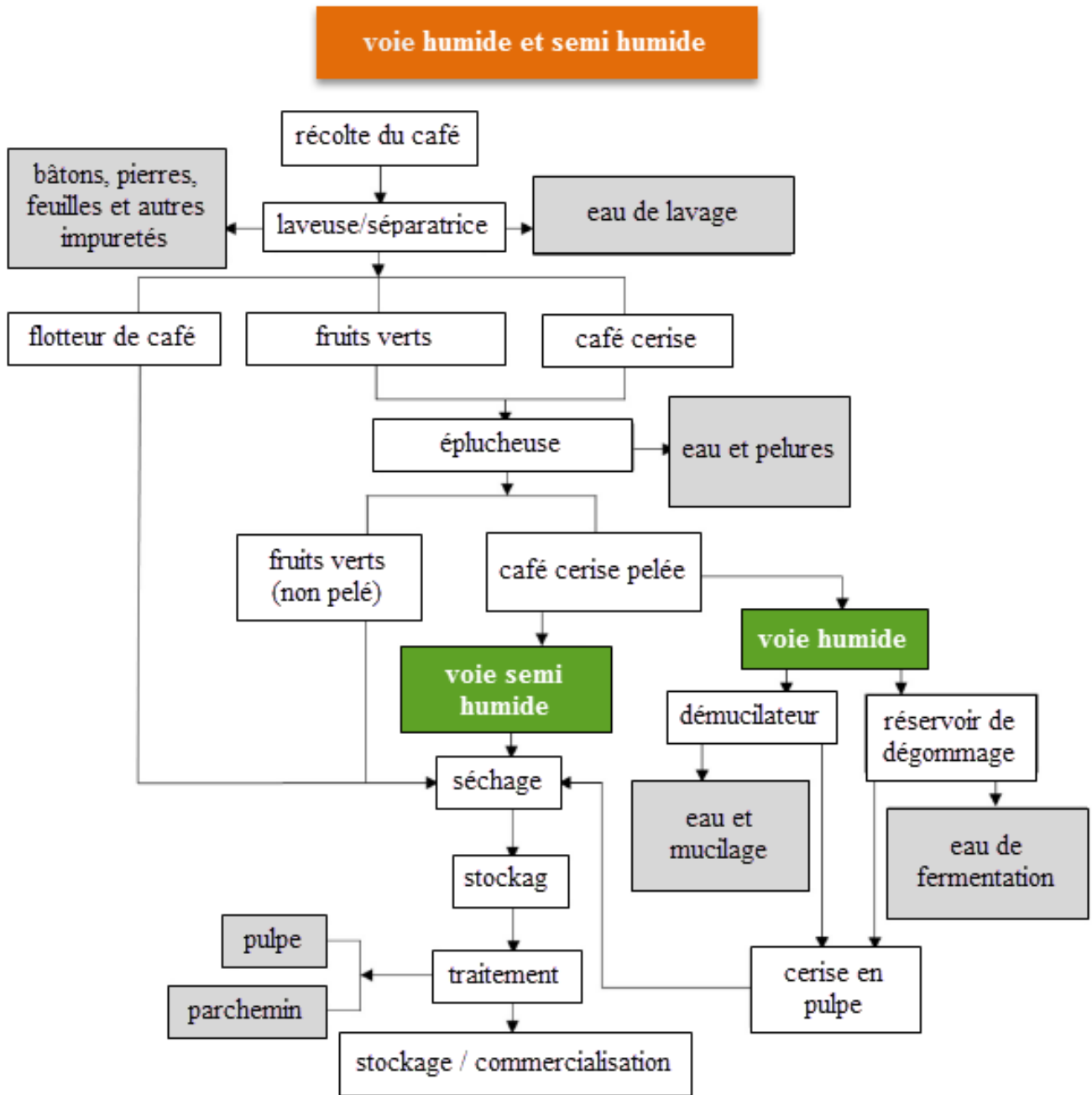


Figure III.02 : Étapes de traitement

« Voie humide » et « Voie semi-humide ». (CAMPOS *et al.*, 2021).

III.03. Présentation du marc de café (MC)

Le marc de café (MC) est la matière résiduelle obtenue lors du traitement de la poudre de café avec de l'eau chaude ou de la vapeur pour la préparation du café instantané. Près de 50 % de la production mondiale de café est transformée pour la préparation de café soluble, qui génère environ 6 millions de tonnes de MC par an (MUSSATTO *et al.*, 2011; BALLESTEROS *et al.*, 2010). En moyenne une tonne de café vert génère environ 650 kg de MC, et environ 2 kg de MC humide sont obtenus pour chaque kg de café soluble produit. (MURTHY et NAIDU, 2012). Le MC représentant 45 à 50 % du total des sous-produits produits dans l'industrie du café, le pourcentage restant est réparti entre la pulpe, les écorces de cerise et la peau parcheminée. (OSORIO-ARIAS *et al.*, 2020).

La (Figure III.03) représente les photos du marc de café humide (a) et du marc de café séché (b) (SOMNUK *et al.*., 2017)



Figure III.03 : Photos du marc de café humide (a) et du marc de café séché (b) (SOMNUK *et al.*., 2017)

III.03.1. Propriétés du marc de café

Le marc de café possède plusieurs caractéristiques physiques et chimiques. Quelques-unes sont exposées ci-dessous.

III.03.1.1. Propriétés physiques du marc de café

Le marc de café possède un haut taux d'humidité variant entre 55 et 80 %. (GOMEZ-DE LA CRUZ *et al.*, 2015) Plus l'humidité est grande plus la croissance microbienne est favorisée, donc des stratégies de conservations optimales sont nécessaires afin de récupérer une matière de qualité. Ces stratégies peuvent représenter des coûts économiques supplémentaires pour le transport. En ce qui concerne la morphologie des grains de marc de café (CARASSOU, 2015).

Le diamètre des grains de marc de café séchés varie entre 50 et 100 μm pour le marc de café commercial. Cependant, ce diamètre augmente avec le taux d'humidité. En effet, lorsque le marc de café devient de plus en plus humide, l'adhésion entre les grains augmente et ces derniers forment des agglomérats de plus grande taille. L'angle de talus quant à lui reste le même, peu importe le taux d'humidité du marc de café. L'angle de talus est une donnée utile pour déterminer les superficies nécessaires des aires d'entreposage du marc de café après l'avoir récupéré. La densité apparente du marc de café est environ de $0,42 \text{ g/cm}^3$ et la densité réelle est d'environ $1,16 \text{ g/cm}^3$. En ce qui concerne leur porosité, les grains de marc de café ne possèdent pas de micropores. En général, la porosité est de 0,63, peu importe le taux d'humidité et la taille des pores, est d'environ 10 μm . Toutefois, cette porosité peut être augmentée si nécessaire en diminuant la cristallinité du marc de café en dégradant sa matrice cellulose-lignine. Enfin, la surface des grains est de charge négative. (Tableau III.01) présente ces différentes données en fonction du taux d'humidité (CARASSOU, 2015).

Tableau III.01 : Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité (SILVA *et al.*, 2012)

Humidité (%)	Angle de talus (°)	Densité apparente (g/cm^3)	Densité réelle (g/cm^3)	Diamètre (μm)	Porosité
0,00	n.d.	n.d.	1,20	50-100	n.d.
15,2	38,7	0,43	1,16	583	0,63
17,7	37,8	0,43	1,16	617	0,63
43,1	37,7	0,41	1,11	880	0,63

n.d: non- défini

Dans la majorité des études sur le marc de café, son pouvoir calorifique est évalué en moyenne à 5000 kcal/kg de matière sèche. Cependant, des études affirment que ce pouvoir est de 5700 kcal/kg. (ZUORRO ET LAVECCHIA, 2012) Le pouvoir calorifique du marc de café est similaire à celui du charbon et est supérieur aux autres biomasses citées dans le tableau 2. Cependant, celui-ci diminue lorsque le taux d'humidité du marc de café augmente. Aussi, la température de combustion spontanée du marc de café est de 460 °C. Les données présentées ici dépendent de la concentration en oxygène et du taux d'humidité du marc de café. Ainsi, lors de l'entreposage du marc de café, ces données doivent seulement être considérées comme des indicateurs, d'autant plus que le stockage de matière humide peut amener à la formation de méthane (CARASSOU, 2015).

Tableau III.02 : Pouvoir calorifique de divers résidus de biomasse (SILVA *et al.* , 2012; ZUORRO ET LAVECCHIA, 2012)

Matière	Pouvoir calorifique (kcal/kg de matière sèche)
Tiges de jute	4619
Enveloppes de riz	3805
Fibre de coco	4707
Paille de blé	4185
Brindilles de coton	3750
Épis de maïs	3804
Bagasse de canne à sucre	4470
Bois	5450
Marc de café	5700

III.03.1.2. Propriétés chimiques du marc de café

Le carbone est l'élément majoritaire du marc de café. Le (Tableau III.03) présente la composition élémentaire du marc de café.

Tableau III.03 : Composition élémentaire du marc de café (LIMOUSY *et al.*, 2013)

Élément	Quantité
Carbone (C)	49,7 %
Hydrogène (H)	n.d.
Azote (N) 2,3 %	2,3 %
Oxygène (O)	n.d.
Ratio H/C	n.d.
Ratio H/C	22

n.d : Non défini

La composition du marc de café est essentiellement faite de polysaccharides, de lipides, de protéines, de polyphénols et de minéraux. (Tableau III.04) présente la proportion des principaux composés retrouvés dans le marc de café *Idem*.

Tableau III.04 : Principaux composés du marc de café (LIMOUSY *et al.*, 2013)
(MUSSATTO *et al.* 2011).

Éléments	Quantité
Glucides	45,3 %
Lipides	9,3-16,2 %
Protéines	14 %
Minéraux	6800 mg/kg de matière sèche
Polyphénols	13-18 mg acidegallique éq

Les glucides sont les éléments les plus abondants dans le marc de café. En effet, le marc de café est riche en cellulose et en hémicellulose. Plus précisément, le marc de café contient 46,8 % de mannose, 30,4 % de galactose, 19 % de glucose et 3,8 % d'arabinose. Ces données varient d'une étude à l'autre, cela pouvant être dû à la variété des grains de café utilisés. Dans le marc de café expresso, le galactomannane est le plus abondant et représente 50 % des glucides. (BALLESTEROS *et al.*, 2010). En ce qui concerne les lipides, les données varient principalement entre 9,3 % et 16,2 %, parfois aux alentours de 20 %. De plus, cet ordre de grandeur ne varie pas significativement entre l'arabica et le robusta. La part de lipides dans les grains café, quant à eux, varie entre 11 % et 20 %. Plus précisément, celle du café arabica varie entre 14 % et 20 % et celle du café robusta entre 11 % et 16 %. Les lipides

n'étant pas extraits de manière efficiente dans un milieu aqueux, il est normal de retrouver la quasi-totalité de ceux-ci après que le café eut été filtré. Une part de lipide relativement similaire dans les différents types de marc de café facilite la récupération du café et sa réutilisation. En effet, la matière récupérée peut ainsi être un mélange des différents marcs de café. Aussi, les lipides du marc de café sont composés de 84,4 % de triglycérides. Ceux-ci sont représentés par l'acide linoléique (C18 :2), l'acide palmitique (C18 :2) et (C16 :0), l'acide oléique (C18 :1) et l'acide stéarique. (MELO *et al.*, 2014). *Idem.*

Les lipides du marc de café contiennent aussi des stérols, dont le sitostérol (10-14 % du marc de café), le stigmastérol (4-5 %) et le campestérol (3-4 %). Ensuite, le marc de café contient entre 6,7 et 14 % de protéines selon les études et est de même ordre chez l'arabica ou le robusta. Cependant, il se peut que ces estimations soient surévaluées à cause de la présence d'autres composés contenant de l'azote tel que la caféine ainsi que plusieurs acides aminés. En effet, 17 aminés sont présents dans le marc de café, dont les neuf acides aminés essentiels. Ces derniers représentent presque 50 % De plus, la concentration des acides aminés essentiels du marc de café industriel est deux fois plus grande que dans le tourteau de soya, celle-ci pouvant être jusqu'à 3,7% dans le marc de café. Aussi, le marc de café possède une forte concentration en acides aminés à chaîne latérale ramifiée (BCAA). Les minéraux sont aussi présents dans le marc de café. Ceux-ci sont en plus grande quantité dans le marc de café à expresso, que dans le marc de café filtre. (Tableau III.05) détaille les principaux minéraux du marc de café *Idem.*

Tableau III.05 : Composition des principaux minéraux du marc de café (MUSSATTO *et al.* 2011).

Minéraux	Quantité (mg/kg)
Potassium	8824 ± 4662
Phosphore	1534 ± 503
Magnésium	2201 ± 1341
Calcium	349 ± 122
Fer	46 ± 21
Manganèse	27 ± 10
Cuivre	25 ± 12

Le marc de café contient également d'autres éléments d'intérêts tels que des antioxydants. Tout d'abord, plusieurs tanins sont présents dans le marc de café. Parmi eux, la catéchine, la gallocatéchine, la gallocatéchine galate et l'acide chébulique. La catéchine est un antioxydant puissant qui possède une action complémentaire à la vitamine C. Les tanins ne sont pas les seuls antioxydants présents dans le marc de café. En effet, d'autres polyphénols sont présents ainsi que de la caféine. La quantité de polyphénols varie entre 13 et 18 mg d'acide gallique équivalent par gramme de marc de café. Parmi ces polyphénols, les principaux sont les flavonoïdes, l'acide protocatéchuique et l'acide chlorogénique. Ce sont les acides chlorogéniques qui sont retrouvés en plus grande abondance, celui-ci étant plus important dans le marc de café arabica que dans le marc de café robusta. (CARASSOU, 2015).

III.04. Les composés bioactifs de Marc de café

III.04.1. La caféine

(1, 3,7-triméthylpurine-2,6-dione) est un métabolite secondaire qui s'accumule pendant le développement du grain de café (SANTOS *et al.*, 2021) Sa structure chimique est thermostable et offre de nombreuses actions/propriétés liées aux propriétés anti-âge, photo protectrices, antioxydantes, anticellulite traitement, traitement de l'acné, entre autres. Outre son activité, une autre raison de l'utilisation de la caféine en dermocosmétique comme adjuvant de protection solaire, agissant en synergie comme photo protecteur et photo stabilisant (ROSADO *et al.*, 2019) Dans une formulation topique, il est important de considérer que même si la caféine est une substance hydrophile qui pénètre dans la peau, elle a tendance à précipiter selon son véhicule et peut former des amas non redispersables (FERNANDES *et al.*., 2015 ; SANTOS *et al.*., 2021).

III.04.2. La trigonelline

La trigonelline (N-méthylpyridinium-3-carboxylate), est un hétérocyclique-alcaloïde-phytochimique, avec de nombreux avantages pour la santé et se trouve principalement dans les graines de café fenugrec (LONE *et al.*, 2020) Il est présent en plus grande quantité dans l'arabica que dans les grains de café robusta . La trigonelline a plusieurs bienfaits pour la santé, ses propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, antiglycation, anti-microbiennes, anti cancérigènes (COSTA *et al.*, 2020 ; NUGRAHINI *et al.*., 2020) Des études récentes ont testé cet alcaloïde pour son activité anti dégranulationvisant un futur produit avec des effets anti-allergiques. La trigonelline a montréinhibition de la dégranulation des mastocytes dans

les études in vitro en modulant lavoies de signalisation intracellulaire impliquées dans la dégranulation (NUGRAHINI *et al.* , 2020) *idem.*

III.04.3.Acides chlorogéniques

Les acides chlorogéniques sont un groupe de composés phénoliques connus sous le nom du plus répandu dans les grains de café vert. Les trois principaux acides chlorogéniques les classes dans le café sont les acides caféoylquiniques (CQA), les acides feruloylquiniques (FQA) et acides dicaféoylquiniques (diCQA) (DUARTE *et al.* , 2010) Les acides chlorogéniques, principalement l'acide 5-caféoylquinique, sont également les principaux groupe de composés phénoliques dans les sous-produits du café après torréfaction. Pourra montrer que la thermogénèse du brun les adipocytes, une fonction désactivée chez l'homme, peuvent être stimulés par l'acide chlorogénique, par stimulation de la synthèse des mitochondries et fonction et la promotion de l'absorption du glucose. Cette constatation pourrait fournir une méthode efficace pour traiter les maladies métaboliques chez l'homme *idem.*

III.05.Écotoxicité

Le marc de café présente une certaine écotoxicité à cause de la présence de caféine, de polyphénols et de tanins. De plus, cette matière possède une forte demande biologique en oxygène et ne peut être rejetée dans la nature telle quelle. Comme vu dans le premier chapitre, la majorité du territoire de l'agglomération de Montréal ne récupère pas la matière organique. Par conséquent, il est fort probable qu'une grande quantité de marc de café soit envoyée à l'enfouissement. Ainsi, le marc de café participe à la consommation du territoire, à la production de biogaz et à la production de lixiviat en remplissant les sites d'enfouissement. Même si les sites d'enfouissements au Québec récupèrent et traitent maintenant les biogaz et le lixiviat, les pressions n'ont pas pour autant disparu. Une récupération spécifique du marc de café diminuerait les pressions dans les sites d'enfouissement. Cependant, dans l'optique où la matière organique sera bannie de l'élimination en 2020 comme mentionnée dans le plan d'action de la troisième PQGMR, la récupération spécifique du marc de café n'aura plus d'effet sur cet enjeu. Effectivement, le marc de café est une matière acceptée dans la récupération de matière organique. (CARASSOU, 2015).

Comme mentionnée dans le premier chapitre, la matière organique qui sera récupérée dans le territoire de l'agglomération de Montréal sera acheminée vers différents sites et produira du compost. Cependant, il a été montré que le marc de café possède un caractère écotoxique. Par conséquent, selon le coefficient de dilution du marc de café dans les autres

matières organiques, il est légitime de se demander si sa récupération jumelée ne contaminera pas les composts produits. Ainsi, la proportion du marc de café présent dans le compost devra être connue, car comme expliquée précédemment, le pourcentage de marc de café dans un compost influe sur la qualité de ce dernier. (CARASSOU, 2015)

III.06. Domaines de valorisation du marc de café

De multiples voies de valorisation et d'utilisations sont possibles avec le marc de café. Parmi celles-ci se retrouvent les productions d'éthanol, de biodiesel, de combustibles pour les fours industriels et de granules de combustion pour les fours résidentiels. Le marc de café peut aussi être utilisé comme 17 substrats pour la culture de micro-organismes, comme compost, peut être utilisé dans l'industrie alimentaire, dans la production de biomatériaux, dans la production de charbon actif, dans le traitement des eaux usées des industries et de l'eau potable, etc. Pour toutes les voies de valorisation qui sont discutées, l'utilisation du marc de café arabica ou robusta est possible, aucune distinction n'a été faite par les études. *Idem.*

III.06.1. Santé et alimentation

Le marc de café possède plusieurs propriétés bioactives. La récupération spécifique du marc de café permettrait l'utilisation de ces bioactifs dans l'alimentation et ainsi améliorer la santé des consommateurs. En outre, certains antioxydants présents dans la nourriture humaine sont synthétiques et leur sécurité est mise en doute. Ainsi, les antioxydants présents dans le marc de café peuvent servir de substitut aux synthétiques en raison de leur bénéfice dans la santé. La substitution d'antioxydants synthétiques dont la sécurité est concernée par les naturels pourrait également être bénéfique en raison de leur implication sur la santé et la fonctionnalité dans le système alimentaire. *Idem.*

III.06.1.1.Santé

L'une des propriétés les plus précieuses du MC est sa teneur élevée en antioxydants et en composés phénoliques tels que l'acide chlorogénique, la caféine et les flavonoïdes. La plupart de ces recherches se concentrent sur l'isolement de ces composés par diverses méthodes d'extraction. Pour s'assurer que le MC utilisé est riche en composé d'intérêt, la spectroscopie Fourier infrarouge (FTIR :) s'est avérée être un outil efficace pour l'évaluation de la teneur en composé précieux dans le MC. (MCNUTT et HE, 2019).

L'extraction est la première étape de l'isolement des composés phénoliques des résidus agro-industriels et des matières végétales. Différentes techniques ont été appliquées pour récupérer des composés phénoliques antioxydants à partir de sources naturelles, notamment

l'extraction solide-liquide avec des solvants organiques, l'extraction assistée par ultrasons, l'extraction assistée par micro-ondes, l'extraction de fluides supercritiques et les procédés à haute pression. Parmi ces techniques, l'extraction solide-liquide est largement utilisée pour l'extraction de composés phénoliques à partir de sources végétales. Cependant, l'efficacité du processus d'extraction est affectée par plusieurs facteurs tels que le type de solvant et sa concentration, le rapport solvant/solide, le nombre d'étapes d'extraction, le pH, le temps de contact, la température et la taille des particules de la matrice solide. Ainsi, il est très important d'optimiser les conditions d'extraction afin de maximiser l'efficacité d'extraction de chaque matière première. (MUSSATTO *et al.*, 2011).

Le MC est été utilisé pour un large éventail d'applications dans la santé et l'alimentation. L'un de ces moyens est de lutter contre les cellules cancéreuses. Des chercheurs ont observé l'apoptose des cellules cancéreuses du côlon lorsque les cellules sont exposées à du MC non digéré et à son métabolite colique. En plus de lutter contre le cancer, il peut également aider à le prévenir. Des chercheurs ont créé des produits de soin de la peau contenant des extraits de MC qui réduisent le photovieillissement et d'autres effets nocifs de la lumière du soleil. (MCNUTT *et al.*, 2019).

Comme mentionné précédemment, les sous-produits du café tels que le MC contiennent de l'acide chlorogénique (ACG), un composant majeur des graines de café vert. (GARCIA-GUTIERREZ *et al.*, 2017). La consommation de l'acide chlorogénique (ACG) peut entraîner des bienfaits remarquables pour la santé, comme dans différents types de cancer. L'ACG est absorbé et métabolisé dans tout le tractus gastro-intestinal. (GARCIA-GUTIERREZ *et al.*, 2017)

Les caroténoïdes sont une autre classe de composés aux propriétés bénéfiques pour la santé qui peuvent être produits à partir du MC OBRUCA *et al.* Converti le MC en polyhydroxyalcanoates (PHA) et en caroténoïdes. Après extraction de l'huile, le MC a été hydrolysé et l'hydrolysate résultant a été utilisé pour la production de caroténoïdes par la souche de levure caroténoïde *Sporobolomyces roseus*. Le même groupe de recherche a également converti les milieux à base de MC en caroténoïdes avec diverses levures et a trouvé que *Sporobolomyces roseus* était le plus efficace, avec un rendement maximal de 1,26 mg/g. (MCNUTT *et al.*, 2019).

Le MC contiennent de grandes quantités de bêta-mannane qui peuvent être hydrolysées thermiquement en mannooglycosaccharide (MOS), qui a une application potentielle comme prébiotique dans l'alimentation humaine et animale. **(BALLESTEROS *et al.*, 2014)**

Le MC a un potentiel antioxydant élevé, des quantités élevées de fibres alimentaires et d'autres composés tels que la caféine. Ces caractéristiques peuvent fournir un potentiel de santé cardiovasculaire. Les composés antioxydants ont de nombreuses applications dans les domaines alimentaire, cosmétique et pharmaceutique, car ils peuvent protéger contre les maladies chroniques et dégénératives et diminuer les facteurs de risque de MCV. **(BALLESTEROS *et al.*, 2014)**

Le MC a été proposé en tant qu'agent protecteur (Nutraceutique) contre l'apparition et les maladies inflammatoires chroniques, telles que les maladies inflammatoires de l'intestin et la polyarthrite rhumatoïde. Cet effet protecteur est associé aux métabolites acides gras à chaîne courte (AGCC) produits par la fermentation colique du MC (AGCC), qui présentaient un fort potentiel anti-inflammatoire en supprimant la production d'oxyde nitrique et en inhibant les médiateurs inflammatoires tels que les cytokines IL-10, CCL-17, CXCL9, IL-1_β et IL-5. . **(MCNUTT et HE, 2019).**

Le MC peut être utilisé dans le domaine cosmétique, comme produit de soin de la peau. Une émulsion contenant 35 % d'huile extraite des GCS présentait des caractéristiques prometteuses en tant qu'écran solaire. Cette formulation est industriellement évolutive et adaptée à une utilisation topique selon l'évaluation rhéologique, mécanique et de sécurité. **(MCNUTT et HE, 2019).**

III.06.1.2. Alimentation Humaine et Industrie Alimentaire

De nombreux constituants du marc de café cités précédemment peuvent être utilisés dans l'industrie de l'alimentation. Les polyphénols présents dans le marc de café sont aussi des composés d'intérêt pour l'industrie alimentaire. Ensuite, la composition en protéine du marc de café donne la possibilité de l'utiliser dans l'alimentation humaine. La haute teneur en BCAA et la faible concentration en acides aminés aromatiques du marc de café sont recherchées pour produire des aliments physiologiquement fonctionnels et répondre à des besoins précis tels que la malnutrition issue de certaines maladies (cancer, brûlure, traumatisme, insuffisance hépatique, etc.). **(CARASSOU, 2015)**

Les polyphénols végétaux sont des composés chimiques importants car ce sont de puissants antioxydants capables de prévenir le développement du cancer. À cet égard, les

grains de café et le marc de café épuisé sont enrichis de composés bioactifs tels que les polyphénols. Par exemple, l'acide chlorogénique et ses dérivés, à savoir. Les acides caféoylquinique, les acides feruloylquiniques, les acides p-coumaroylquiniques et les esters des acides caféique et férulique avec l'acide quinique sont présents dans les grains de café et le marc de café épuisé (**ZUORRO ET LAVECCHIA, 2012**) . L'acide chlorogénique subit partiellement une isomérisation et une déshydratation pendant la torréfaction des grains de café, ce qui donne de la quinolactone et des composés isomérisés. Ces antioxydants peuvent être utilisés pour la production d'aliments fonctionnels et de compléments alimentaires à valeur ajoutée. Une étude de **ZUORRO et LAVECCHIA** a démontré qu'environ 90 % d'extraits phénoliques peuvent être obtenus à partir de café moulu épuisé en utilisant de l'éthanol aqueux au cours de la méthode d'extraction par solvant (**ZUORRO ET LAVECCHIA, 2012**). La récupération des composés phénoliques peut être encore améliorée en appliquant une optimisation de la surface de réponse. Le long de cette ligne, un procédé d'extraction solide-liquide utilisant du méthanol comme solvant est rapporté. Cependant, le méthanol est un composé toxique. Par conséquent, les applications des antioxydants obtenus par cette méthode sont limitées dans les industries de l'alimentation et des sciences de la vie (**MUSSATTO et al., 2011**). (**KARMEE, 2018**).

Les grains du marc de café peuvent servir de support enzymatique pour des processus d'enrichissement en isoflavones dans le lait de soya. (Chen et autres, 2013) Aussi, le marc de café possède une très bonne propriété émulsifiante qui peut être utilisée dans l'industrie alimentaire (**BALLESTEROS et al., 2010**). (**CARASSOU, 2015**).

En raison de sa forte concentration en antioxydants, le MC a été étudié pour être utilisé dans l'industrie alimentaire pour ses bienfaits pour la santé. Il a été démontré que l'ajout de MC à la viande et à d'autres aliments fournit d'excellentes propriétés antioxydantes, tout en réduisant la croissance bactérienne pathogène et la détérioration des aliments. En plus d'être une bonne source d'antioxydants, il s'est également avéré riche en fibres et en acides aminés essentiels, et faible en sucres glycémiques. Des chercheurs ont également constaté que le MC dans un tube digestif simulé avait encore une activité prébiotique élevée après la digestion. Enfin, il a été découvert que la MC réduisait la libération de médiateurs inflammatoires, aidant ainsi à contrôler l'inflammation dans le côlon. Pour ces raisons, on pense qu'il s'agit d'un bon additif alimentaire qui peut réduire le risque d'obésité et de diabète. (**MCNUTT, et HE, 2019**).

Les caroténoïdes sont des pigments largement utilisés dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. Divers microbes comme les levures, les champignons filamenteux, les bactéries et les algues sont capables de produire des pigments en utilisant des déchets organiques comme source de carbone. L'hydrolysate de marc de café épuisé a été consommé comme substrat par la levure caroténoïde *Sporobolomyces roseus* pour la production de caroténoïdes (OBRUCA *et al.*, 2015). (KARMEE, 2018).

Les tanins sont également des composés d'intérêt dans cette industrie. De cette manière, il est intéressant d'étudier les possibilités dans ce domaine (MUSSATTO *et al.*, 2011). Aussi, le marc de café possède des propriétés probiotiques recherchées dans l'industrie alimentaire. Toutefois, le marc de café utilisé dans cette optique doit au préalable être dénué de mélanoides, car ces composés présents dans le marc de café possèdent une très bonne activité antimicrobienne. Cependant, grâce à cette propriété antimicrobienne, les mélanoides peuvent être utilisés pour lutter contre la croissance de pathogènes dans les aliments. (ZAMORA *et al.*, 2015) (CARASSOU, 2015).

En effet, le marc de café peut, par exemple, être utilisé pour la fabrication de spiritueux à saveur de café (SAMPAIO *et al.*, 2013). (CARASSOU, 2015)

Le MC a été utilisé comme boisson originale ; en effet, une boisson distillée à l'arôme de café a été développée par extraction aqueuse de composés aromatiques à partir de MC, complétée par du sucre et la production d'éthanol. (SAMPAIO *et al.*; 2013)

III.06.1.3. Alimentation animale

La première voie viable de valorisation du Marc de café était de l'appliquer comme additif alimentaire pour l'alimentation animale. Malheureusement, le MC non modifié souffre d'une teneur élevée en composés phénoliques et en caféine, ce qui limite leur digestibilité (KOVALCIK *et al.*; 2018)

Dans d'autres travaux, des chercheurs ont constaté que le MC brut était une matière première animale appropriée, mais que la fermentation de celui-ci produisait une matière première impropre à la consommation animale. (MCNUTT *et al.*, 2019).

D'autres travaux ont montré que le marc de café peut être incorporé à la nourriture des animaux domestiques comme les ruminants, les poulets et les lapins. Cependant, la haute teneur en lignine dans le marc de café pose des limites à cette option. (MUSSATTO *et al.*, 2011). (CARASSOU, 2015).

III.06.2. Agriculture

Dans ce domaine, le marc de café est utilisé pour la fabrication des engrais et du compost et pour la culture de micro-organismes et de champignons comestibles.

III.06.2.1. Production de compost et d'engrais

Avec un bon ratio C/N, le marc de café peut être utilisé comme fertilisant. Ainsi, trois méthodes de compostage avec du marc de café ont été comparées, soit le vermicompostage, le compostage en cuve et le compostage en andain. Le compostage en cuve présente des résultats plus rapides, mais montre une plus grande perte en azote. Or le compostage en andain montre une plus grande augmentation en azote à hauteur de 75 %. En ce qui concerne le vermicompostage, il est fortement suggéré d'agir en cocompostage en mélangeant le marc de café avec d'autres matières organiques pour augmenter la quantité de nutriments (**ADI et NOOR, 2009**), car l'utilisation du seul marc de café augmente la mortalité des vers de terre. (**LIU et PRICE, 2011**) (**CARASSOU, 2015**)

Une autre étude a montré que le marc de café à expresso utilisé seul diminue la concentration en minéraux des feuilles de laitue, notamment par la présence de certains constituants bioactifs telle que la caféine. Cependant, les concentrations des macroéléments et des éléments bioactifs augmentent lorsque le marc de café est mélangé avec un autre compost, dans une proportion allant de 5 % à 30 % selon les études. Aussi, l'utilisation de marc de café dans un mélange de compost avec une proportion supérieure de 10 % peut provoquer une augmentation des qualités nutritionnelles des cultures de laitue, mais une légère diminution des rendements (**CRUZ et al., 2015**). (**CARASSOU, 2015**).

Par exemple, l'activité antioxydante des laitues peut être augmentée grâce à l'utilisation de marc de café. De plus, l'utilisation de marc de café dans une proportion de 20 % à 30 % intensifie la couleur des feuilles de laitues. Ainsi, l'utilisation du marc de café dans la culture de laitue est à considérer si une qualité nutritionnelle supérieure est privilégiée au rendement. Dans le cas où le rendement avec une qualité standard est recherché, le marc de café n'est peut-être pas la solution. (**CRUZ et al., 2015**). (**CARASSOU, 2015**).

Des chercheurs ont découvert que la MC peut être bénéfique pour la croissance des plantes dans certains cas. Des chercheurs ont constaté que jusqu'à 40 % de compost de MC

mélangé à de la tourbe présentait des avantages pour les peuplements végétaux et avait une qualité similaire à ceux produits avec des engrais ordinaires. **CRUZ et al.** Ont constaté que la laitue Batavia pouvait être cultivée sans aucune perte de rendement avec jusqu'à 10 % du sol étant du MC, et a constaté que tout en augmentant le MC à 20 ou 30 % diminuait le rendement, cela augmentait également les pigments photosynthétiques rendant les plantes plus attrayantes visuellement pour les consommateurs. Dans deux autres études, **CRUZ et al.** Ont également confirmé que de faibles niveaux de MC dans le sol contribuaient à l'augmentation de la teneur en minéraux, des composés bioactifs et de l'activité antioxydante. des chercheurs Ont testé le MC ainsi que divers autres déchets organiques et ont constaté qu'ils réduisaient le lessivage des pesticides dans le sol. Comme une trop grande exposition au MC s'est avérée préjudiciable aux plantes, des chercheurs Ont développé des granulés d'engrais de MC à action lente, qui libèrent progressivement des éléments. Diverses autres études ont été menées sur l'effet du mélange de MC lors du compostage dans différents rapports, avec des résultats pour la plupart positifs (**MCNUTT et HE, 2019**).

Malgré l'utilisation de nombreux déchets organiques dans le compostage ou comme engrais, l'application directe du marc de café épuisé sur le sol s'est avérée préjudiciable en raison de son rapport C/N élevé, de sa teneur en phénol et de son acidité. Dans une étude réalisée avec le brocoli, le poireau, le radis, l'alto et le tournesol par des chercheurs, toutes les plantes ont empiré avec l'ajout direct du MC. (**MCNUTT et HE, 2019**).

Enfin, soumis à une biométhanisation, le digestat recueilli mélangé avec 25 % à 50 % de tourbe donne un compost de très bonne qualité (**KOSTENBERG et MARCHAIM, 2008**). Cependant, cette utilisation n'est pas probable à Montréal, car les usines de biométhanisation sont prévues pour traiter une récupération globale de la matière organique, dont le marc de café fait partie. Ainsi, une récupération spécifique du marc de café en vue d'une biométhanisation n'est pas envisageable. (**CARASSOU, 2015**)

III.06.2.2. Substrat pour la culture de micro-organismes et de champignons comestibles

Le marc de café peut être utilisé comme substrat pour la production de caroténoïde grâce à la culture de levure. Les caroténoïdes sont utilisés dans les industries agroalimentaires (colorant), cosmétiques et pharmaceutiques et sont donc des composés d'intérêts. (**PETRICK et al., 2014**) Le marc de café peut aussi servir de substrat pour la culture de champignons comestibles sans ajout de supplément nutritionnel. La haute teneur en protéines et en humidité du marc de café explique certainement ce phénomène, car ce sont deux paramètres essentiels à la croissance de micro-organismes et de champignons (**MUSSATTO et al., 2011**). Par

exemple, le marc de café permet la culture d'un champignon riche en protéine, *Lentinus edodes*, qui possède également de nombreux avantages nutritionnels. Les rendements et la qualité des cultures dépendent du taux d'humidité du marc de café utilisé. Ainsi, un taux d'humidité de 55-60 % est optimal pour ce champignon. Aussi, dans l'hypothèse d'utiliser le marc de café dans la culture de champignons, il est essentiel de connaître les meilleures conditions de culture qui peuvent varier d'une espèce à une autre, car de ces conditions découlent les études de faisabilités techniques et financières. (CARASSOU, 2015).

Toutefois, il a été montré que le marc de café peut être utilisé pour la culture de champignons sans avoir à subir de traitements au préalable. (MURTHY et NAIDU, 2012). En somme, le marc de café est un substrat à considérer pour la culture de micro-organismes et de champignons, de nombreuses portes pouvant être ouvertes par cette voie, notamment l'industrie de l'alimentation. (CARASSOU, 2015).

III.06.3. Matériaux

III.06.3.1. Biopolymère et biocomposite

En plus des polyphénols et des biosorbants, aussi des produits à valeur ajoutée comme les biopolymères et les biocomposites sont obtenus à partir du déchet du marc de café. Actuellement, les applications des polymères biosourcés à savoir les polyhydroxyalcanoates deviennent importantes car ils sont biodégradables et leurs propriétés thermoplastiques et élastomères peuvent être manipulés. Le long de cette ligne, le marc de café épuisé est converti en hydrolysats par hydrolyse acide. L'hydrolysats obtenu est ensuite transformé biotechnologiquement en polyhydroxyalcanoates à l'aide des micro-organismes *Bacillus megaterium* et *Burkholderiacepacia* (**OBRUCA *et al.*, 2015**). L'isolement complet des polyphénols du marc de café épuisé avant la réaction hydrolytique a conduit à une augmentation de 25 % du rendement en polyhydroxyalcanoates. En outre, **OBRUCA *et al.* (2014)** ont étudié l'utilisation de l'huile de café épuisée pour la production de poly (3-hydroxybutyrate) à l'aide de *Cupriavidus necator* H16. De plus, des polyols liquides peuvent être préparés à partir de marc de café épuisé via une méthode de liquéfaction à base d'acide sulfurique en utilisant du PEG 400/glycérol comme solvants. Les propriétés des polyols synthétisés sont similaires aux propriétés des polyols à base de pétrole utilisés pour la production industrielle de mousses de polyuréthane. Ces polyols dérivés du café épuisé sont utilisés pour la synthèse de polyuréthanes biosourcés. Pour ce faire, l'isocyanate a été mis à réagir avec les polyols obtenus à partir de marc de café épuisé pour produire des mousses de polyuréthane et le degré de polymérisation a été surveillé par spectroscopie infrarouge. (**KARMEE, 2018**).

III.06.3.2. Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments largement utilisés dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. Divers microbes comme les levures, les champignons filamenteux, les bactéries et les algues sont capables de produire des pigments en utilisant des déchets organiques comme source de carbone. L'hydrolysats de marc de café épuisé a été consommé comme substrat par la levure caroténogène *Sporobolomyces roseus* pour la production de caroténoïdes (**OBRUCA *et al.*, 2015**). (**KARMEE, 2018**)

III.06.4. Matériau de construction

Le marc de café trouve d'autres applications dans le domaine de la construction et du Génie civil en tant que matériau de fondation ; il peut être utilisé seul ou mélangé avec d'autres déchets.

III.06.4.1. Matériau de remplissage de fondation

Le MC a été mélangé à d'autres déchets afin de produire des matériaux avec des résistances à la compression ultimes élevées, adaptés à une utilisation comme matériau de fondation. Des chercheurs Ont expérimenté la création de matériaux de fondation à base de MC, mélangés à une combinaison de verre recyclé, de cendres de bagasse, de cendres volantes et de scories. Les matériaux créés à partir du mélange de MC avec de la cendre avaient une résistance ultime à la compression (UCS) d'environ 1,5 MPa, tandis que le matériau fabriqué par mélange avec du verre avait une UCS proche de 11 MPa. Des chercheurs Ont également expérimenté le MC et le laitier, mais ont également utilisé de la cendre de balle de riz, donnant un matériau avec un UCS de 2 MPa. Des chercheurs Ont effectué plusieurs tests sur l'utilisation du MC pour les matériaux de fondation. Ils ont découvert que le laitier était un meilleur matériau complémentaire au MC que les cendres volantes, et que tandis que l'UCS d'un mélange de laitier 70 MC : 30 était bon (près de 2 MPa), un rapport de mélange de 50/50 produisait un matériau de très faible résistance. De plus, ils ont découvert que le ciment Portland et la chaux hydratée produisaient des matériaux de très mauvaise qualité. présente les résultats des études réalisées sur le MC en tant que matériau de remplissage de fondation. **(MCNUTT et HE, 2019).**

L'application du MC dans la fabrication de briques, en tant qu'additif, a également été étudiée. Des chercheurs Ont construit des briques avec du MC et ont constaté que les briques contenant 17 % de déchets de MC avaient encore une résistance à la compression supérieure à 10 N/mm² et pouvaient donc être utilisées structurellement. Ces briques avaient également une conductivité thermique moins bonne (réduite de 50 %), ce qui en fait de meilleurs isolants que les briques ordinaires. Des chercheurs Ont également testé des briques partiellement composées de MC et ont constaté que jusqu'à 10 % de MC présentaient toujours le plus haut niveau de normes mécaniques, et l'ajout de 20 % diminuait la conductivité thermique de 70. **(MCNUTT et HE, 2019).**

III.06.4.2. Utilisation comme remblai pour les abords des routes

Les propriétés mécaniques du marc de café sont propices à son utilisation comme remblai pour les abords des routes, mais ne le sont pas pour le remblai des routes elles-mêmes. L'utilisation du marc de café comme remblai ne semble poser aucun problème environnemental selon une étude. Cette dernière affirme que la concentration des composants du marc de café est inférieure aux limites de l'Agence de protection de l'environnement (EPA) des États-Unis, dans la désignation d'un déchet dangereux. Cependant, cette étude ne fait pas référence à la présence de caféine et de polyphénols. Ainsi, leur extraction serait peut-être nécessaire avant l'utilisation du marc de café comme remblai. Cette extraction est possible par l'intermédiaire de souches fongiques (MUSSATTO *et al.*, 2011). Aussi, l'utilisation massive du marc de café comme remblai risque de provoquer une forte demande biochimique en oxygène en cas de lessivage compte tenu de sa haute teneur organique. Cependant, comme mentionné plus haut, le marc de café peut améliorer la qualité des composts. Ainsi, le mélange de cette matière avec le sol pour le remblai peut permettre à une meilleure végétalisation des fossés. L'annexe 17 illustre la possibilité d'utiliser le marc de café comme remblai pour les abords des routes. (CARASSOU, 2015).

➤ **Autres applications :**

- ❖ Isolant thermique ;
- ❖ Applications insonorisantes ;
- ❖ Produire les agrégats de céramique argileuse légère ;
- ❖ L'huile de MC et utilisée comme régénérateur de liant d'asphalte... (SABERIAN *et al.*, 2021).

III.06.5. Environnement

III.06.5. 1. Bioadsorbant

Le déchet du marc de café est utilisé dans le domaine de l'environnement comme adsorbant pour le traitement des effluents industriels et même des eaux potables. Il peut être utilisé sans traitement particulier ou après traitement (activation chimique ou thermique).

Le charbon actif ainsi produit possède une performance comparable ou meilleure que les charbons actifs commercialisés sur le marché actuel. Dans l'optique

de produire du charbon actif à partir de marc de café, ce dernier ne doit pas être exploité au préalable pour sa caféine. En effet, la caféine joue un rôle important dans la préparation du charbon actif en tant que catalyseur. Le marc de café semble avoir une grande affinité avec le dioxyde de carbone, CO₂, émis lors des combustions industrielles, plus qu'avec le diazote, N₂. Les processus actuels de captation du CO₂ sont notamment basés sur une adsorption avec des amines, cependant, ces procédés demandent une grande intensité énergétique. Or, l'utilisation du marc de café exige des dépenses plus basses en plus d'offrir une plus grande stabilité d'adsorption dans des conditions humides. Aussi, la régénération de charbon actif fait à partir de marc de café est plus facile. (GONZALEZ *et al.*., 2013)

Le MC s'est avéré être un adsorbant efficace pour un large éventail de contaminants. Les ions métalliques, les colorants et les composés bioactifs ont tous été éliminés de l'eau dans une certaine mesure grâce à l'utilisation de MC comme adsorbant (CARASSOU, 2015).

Les biosorbants durables ont démontré des applications potentielles pour le traitement des déchets liquides. À cet égard, le marc de café épuisé peut être utilisé comme adsorbant peu coûteux pour éliminer les colorants, les métaux lourds et les polluants (KARMEE, 2018)

Afin de traiter les eaux de polluants organiques ou encore de colorants, beaucoup de procédés sont proposés, tels que la coagulation, la sédimentation, la filtration, l'oxydation et l'adsorption. Parmi toutes ces méthodes, l'adsorption ressort comme étant une pratique efficace. Cependant, les coûts liés aux charbons actifs vendus sur le marché sont élevés. Ainsi, le marc de café représente un substitut bon marché à ces produits onéreux.

De plus, l'adsorption effectuée grâce à l'utilisation du marc de café peut être plus efficace que des charbons actifs actuellement commercialisés.

Récemment, l'utilisation de nanostructures pour éliminer les colorants et les métaux lourds des eaux usées a suscité de plus en plus d'intérêt. La plupart de ces nanostructures sont fabriquées à partir de matières premières biosourcées grâce à des méthodes respectueuses de l'environnement (MCNUTT et HE, 2019).

Le (tableau III.06) résume les résultats de diverses études réalisées sur les propriétés d'adsorption du MC.

Tableau III.06 : Résultats de diverses études sur les propriétés adsorbantes du MC. (MCNUTT et HE, 2019).

Description	Contaminant	Capacité
MC pré-blanchi enduit de polyéthylèneimine et d'ions Fe	As ⁵⁺ , Cu ²⁺ et P ⁵⁺	CAM : 83,3, 200,1 et 50,2 mg/g
MC séchage solaire	Ni ²⁺	CAM : 4,29 mg/g
Charbon actif de MC	Cu ²⁺	rendement : 18%
MC	Sr ²⁺	CAM : 69,01 mg/g
MC	Cu ²⁺	CAM : 0,214 mmol/g
Mousses composites bioélastomères	Pb ²⁺ et Hg ²⁺	CAM : 13,5 mg/g et 17,1 mg/g
Charbon actif granulaire de MC	Orange acide 7 et bleu de méthylène	CAM : 665,9 mg/g et 986,8 mg/g
marc de café magnétique	Orange d'acridine	CAM : 73,4 mg/g
MC avec Fe ₂ O ₄	Tétracycline	CAM : 285,6 mg/g
Charbons actifs de MC	CO ₂	CAM : 4,9 mmol/g
Carbone de MC	CO ₂	CAM : 3 mmol/g
Charbon actif de MC	N-butane et éthylène	VAM : 84 et 51 cm ³ /g

CAM : capacité d'adsorption maximale, VAM : volume d'adsorption maximum.

III.06.5. 2. Impacts environnementaux de la récupération du marc de café et de sa mise en valeur

Comme dit précédemment, le marc de café est un produit contenant beaucoup de composés, dont la caféine, des tanins et des polyphénols. Ces composés à caractère écotoxique ne doivent pas se retrouver dans la nature, particulièrement dans les cours d'eau. En effet, le marc de café crée alors une forte demande en oxygène. (SILVA *et al.*, 2012) Ainsi, la récupération du marc de café a des impacts sur l'environnement. Aussi, en fonction de la valorisation effectuée, celle-ci a également des impacts sur

l'environnement, notamment la diminution des pressions sur le territoire, sur certaines ressources naturelles, et sur la qualité des eaux (CARASSOU, 2015)

III.06.6. Production d'énergie et de bicarburnats

III.06.6.1. Combustion directe et combustibles solides

La pollution de l'environnement associée à l'épuisement des combustibles fossiles poussent les chercheurs à effectuer des recherches de pointe sur les énergies alternatives.

L'utilisation de matières premières comestibles pour la production de biocarburants a un impact direct sur les prix des denrées alimentaires, générant un débat nourriture contre carburant. Alternativement, des matières premières non comestibles sont exploitées pour la production de biocarburants. Cependant, certaines des cultures de biocarburants non comestibles nécessitent des ressources, telles que de l'eau, des engrais et des terres pour la culture. Ceux-ci ont conduit à plus de controverses, puisque certains décideurs politiques qualifient la culture de biocarburants de « crime contre l'humanité ». Pour éviter ces problèmes négatifs, l'utilisation de déchets organiques, à savoir les déchets alimentaires et le déchet du marc de café pour la production de biocarburants est primordiale. À cet égard, le marc de café épuisé est utilisé industriellement comme combustible dans les chaudières en raison de son pouvoir calorifique élevé. (KARMEE, 2018).

Le MC a été testé en tant que source de combustible de plusieurs manières différentes, allant de l'utilisation du MC seul comme combustible de chaudière, au mélange avec d'autres biomasses. (MCNUTT et HE, 2019).

Tableau III.07 : Valeur calorifique du marc de café et autres résidus de biomasse. (KARMEE, 2018)

Biomasse	Valeur calorifique	
	kcal/kg sec	kJ/kg sec
Cosses de riz	3805,3	15906,1
Fibre de noix de coco	4707,8	19678,7
Paille de blé	4185	17493,3
Bois	5450	22781
Marc de café	5960	24912,8

III.06.6.2. Combustible pour les fours industriels

L'utilisation du marc de café par les usines de fabrication de café soluble permet à ces dernières de disposer également des particules solides résiduelles de l'étape de centrifugation de leur processus en les ajoutant dans la combustion. Enfin, la disposition de ces résidus dans la nature n'est pas souhaitable à cause de leur forte demande en oxygène. De plus, les cendres issues de cette combustion sont de bons fertilisants à cause d'une forte concentration en phosphore, calcium et magnésium. (SILVA *et al.* , 2012) (CARASSOU, 2015).

III.06.6.3. Granules de combustion pour les fours résidentiels

Les granules de combustion produites à partir du marc de café possèdent un pouvoir calorifique de 25 240 kJ/kg, soit environ 6 000 kcal/kg lorsque le taux d'humidité est de zéro (GOMEZ-DE LA CRUZ *et al.*, 2015)). Cependant, malgré un fort pouvoir calorifique, la fabrication de granules de combustion composées à 100 % de marc de café n'est pas recommandée. En effet, son utilisation comme unique source de combustible diminue l'efficacité des fours et augmente les émissions de gaz et de particules. Cependant, un mélange de 50 % de marc de café et de 50 % de sciure de bois augmente l'efficacité de combustion qui devient plus grande que celle de bois pur. Toutefois, malgré une diminution des émissions de gaz et de particules du mélange par rapport au marc de café pur, celles-ci restent au-dessus des émissions du bois pur. Le tableau 2.7 résume les paramètres de combustion du marc de café seul et en mélange comparativement à de la sciure de pin. (LIMOUSY *et al.*, 2013) (CARASSOU, 2015).

Tableau III.08 : Émissions de gaz et de particules selon le combustible.
(CARASSOU, 2015).

Échantillon	Marc de café	Sciure de pin	Mélange 50-50
Efficacité combustion (%)	86,3	90,8	91,9
Efficacité four (%)	64,1	84,3	83,5
Monoxyde carbone (ppm)	1785	153	353
Monoxyde d'azote (ppm)	178	45	193
Dioxyde d'azote (ppm)	28	0	8
Composés organiques volatils (ppm)	539	330	209
Particules (mg/Nm³)	1071	104	310

Le marc de café peut ainsi produire une multitude de combustibles. À la suite de ces productions, le marc de café peut encore être utilisé en pyrolyse pour fabriquer du biochar. (CARASSOU, 2015).

III.06.6.4. Production de biogaz ou en gaz de synthèse

Une autre manière dont le MC a été utilisé pour la production d'énergie est la conversion en biogaz ou en gaz de synthèse. Ces deux méthodes sont généralement effectuées par digestion ou par gazéification/pyrolyse thermique, respectivement. (MCNUTT et HE, 2019).

III.06.6.5. Biogaz

La digestion anaérobie en tant que méthode de traitement des déchets organiques a un énorme potentiel. La production de biogaz à partir de marc de café épuisé est signalée. Des boues contenant 20 % (p/v) de déchets solides de café ont été traitées de manière anaérobie dans des systèmes de fermentation au méthane thermophile à une et deux phases. Il a été observé qu'une fermentation méthanique en deux phases pouvait être répétée de manière stable en système fermé sans rejeter autre chose que les résidus de déchets de café. De plus, un processus de biométhanisation anaérobie des déchets de café instantané avec des boues activées provenant d'une usine de traitement des eaux usées a été réalisé dans des conditions mésophiles. Au cours de ces études, des rendements en méthane de l'ordre de 0,24 à 0,28 m³ CH₄ (STP/kg VS (solides volatils) initial ont été obtenus. La codigestion anaérobie thermophile du marc de café épuisé et des boues a été réalisée par Des chercheurs. (KARMEE, 2018).

III.06.6.6. Production de biodiesel

Les lipides extraits du marc de café peuvent servir de matières premières pour la production de biodiesel. En effet, les lipides du marc de café peuvent être extraits et subir une transestérification afin de produire des esters méthyliques d'acide gras (EGAM). Toutefois, les lipides extraits du marc de café présentent une haute acidité qui diminue la rentabilité en biodiesel. Ainsi afin de rendre optimale la production de biodiesel, une étape d'estérification est requise préalablement à la transestérification. Malgré une diminution de l'acidité, le biodiesel produit dans le cadre de cette étude ne répond pas aux exigences de la norme ASTM D 6751-07b d'ASTM international qui sert de référence aux États-Unis. Par conséquent, l'étude recommande d'utiliser ce biodiesel produit comme additif dans du diesel conventionnel ou l'ajouter à du biodiesel de meilleure qualité. (CARASSOU, 2015).

Toutefois, d'autres études qualifient le biodiesel produit à partir du marc de café comme étant de très bonne qualité. En effet, le biodiesel produit possède une stabilité élevée en raison de sa haute teneur en antioxydants et résiste facilement à la congélation. Selon une étude, 100 g de marc de café peut donner 13,1 ml de biodiesel. (CARASSOU, 2015).

La production de biodiesel est l'un des sujets de recherche les plus populaires concernant le MC pour l'utilisation de l'énergie. Le processus consiste d'abord à

extraire les huiles au sein du MC, puis à transestérifier les huiles extraites en esters méthyliques d'acides gras (FAME), communément appelés biodiesel. (MCNUTT et HE, 2019).

III.06.6.7.Catalyse basique et acide

Après extraction, l'huile de café usée obtenue est convertie en biodiesel à l'aide de méthodes chimiques et biocatalytiques. Les catalyseurs basiques (KOH et NaOH) et acides (H_2SO_4 et HCl) sont largement utilisés comme catalyseurs chimiques pour la préparation de biodiesel. (KARMEE, 2018).

III.06.6.8.Catalyse lipasique

Diverses préparations de lipases ont été utilisées pour la production de biodiesel à partir d'huile extraite du marc de café épuisé. Dans des conditions de réaction optimisées, 88 % de conversion du biodiesel a été atteint en 24 h. De plus, combi-CLEA (agrégats d'enzymes de réticulation) a été utilisé pour la valorisation de l'huile de café usée en biodiesel avec une conversion de 83 %. (KARMEE, 2018).

III.06.6.9.Production de biodiesel assistée par ultrasons

L'application de méthodes non conventionnelles telles que l'irradiation par micro-ondes et l'intensification des processus assistée par ultrasons gagnent en importance pour la synthèse de biocarburants. L'huile du marc de café épuisé a été extraite par ultrasons dans un milieu n-hexane. Un rendement de 12% d'huile principalement composée d'acides palmitique et linoléique a été obtenu. (KARMEE, 2018).

III.06.6.10.Préparation in-situ de biodiesel à partir de marc de café épuisé

La préparation in situ de biodiesel à partir de marc de café épuisé est actuellement à l'étude. Dans un tel système, l'extraction de l'huile de café et son utilisation simultanée via des réactions de transestérification /estérification se produisent dans un seul pot. Cela évite l'utilisation d'un excès de solvant organique et l'étape d'isolement de l'huile. La production in situ de biodiesel à partir de marc de café épuisé, sec et désacidifié à l'aide de catalyseurs acides et basiques dans un seul système de solvant est étudiée. (KARMEE, 2018).

III.06.6.11.Diesel renouvelable

Le diesel renouvelable présente de nombreux avantages par rapport au biodiesel, tels qu'un indice de cétane élevé, la flexibilité de la matière première lors de la préparation et la stabilité à l'oxydation. En outre, une différence majeure entre le diesel renouvelable et le biodiesel est que le diesel renouvelable n'est pas un carburant

oxygéné, ce qui le rapproche du carburant à base de pétrole en ce qui concerne la structure chimique. Le procédé d'hydrotraitement est largement étudié pour la production de diesel renouvelable. À cet égard, l'huile à haute teneur en FFA extraite du marc de café épuisé est utilisée pour l'hydrotraitement. En utilisant cette méthode, les esters méthyliques d'acides gras obtenus à partir d'huile de café usée peuvent être transformés en carburants à base d'hydrocarbures. (KARMEE, 2018).

III.06.6.12. Bioéthanol et bioéthers

Comme mentionnée précédemment, la production de bioéthanol et de biodiesel est possible avec les mêmes grains de marc de café comme l'illustre l'annexe 15. En effet, la production d'éthanol correspond à l'exploitation des sucres et la production de biodiesel correspond à l'exploitation des lipides. La production d'éthanol directement à partir de marc de café n'est pas une méthode viable, car la présence des lipides ralentit la réaction enzymatique de saccharification. Ainsi, l'extraction des lipides est nécessaire afin de produire du bioéthanol de manière efficace à partir de marc de café. Selon une étude, 100 g de marc de café peuvent donner 10,6 ml de bioéthanol. (CARASSOU, 2015).

Les grains de café et le marc de café épuisé sont connus pour contenir une quantité substantielle de glucides. Cela fait du marc de café épuisé une matière première idéale pour la production de bioéthanol (MUSSATTO *et al.*, 2011). Dans un premier temps, la matière lignocellulosique présente dans la charge est prétraitée (hydrolysée) pour obtenir des petits sucres. Le prétraitement (hydrolyse) du marc de café épuisé est effectué à l'aide de méthodes catalysées par un acide, une base et des enzymes. (KARMEE, 2018).

Le bioéthanol obtenu peut être converti en bioéthers destinés au marché européen de l'essence. L'éther éthyl-tert-butyle (ETBE) est préparé via une réaction entre l'éthanol (EtOH) et l'isobutylène ou l'alcool tert-butyle. L'ETBE est utilisé comme additif pour carburant dans plusieurs pays de l'UE, tels que la France, les Pays-Bas, l'Allemagne, l'Espagne et la Belgique. Un procédé approprié pour sa préparation est l'éthérisation des iso-oléfines. L'essence entière de FCC (craquage catalytique fluide) peut être utilisée comme source d'iso-oléfines pour l'éthérisation. Une large gamme de production d'éther est réalisable par l'auto-éthérisation FCC avec de l'éthanol qui peut augmenter l'indice d'octane et soutenir la demande d'éthers oxygénés. (KARMEE, 2018).

III.06.6.13.bio-huile

La pyrolyse est une autre méthode populaire pour produire de la bio-huile brute à partir de MC. Il décrit le processus simple de décomposition des matériaux par décomposition thermique. Environ 60 % des produits sont généralement sous forme liquide, majoritairement huileuse. Des chercheurs ont examiné l'impact du CO₂ sur la pyrolyse. Ils ont découvert qu'une augmentation du CO₂ accélère le craquage thermique et réagit avec les composés organiques volatils (COV) dans le mélange. Cela rend également le biochar produit plus poreux, ce qui pourrait être utile dans l'amendement du sol car il favorise la croissance bactérienne et fongique. (MCNUTT et HE, 2019).

III.06.6.14.Extraction de l'huile du marc de café épuisé

La quantité d'huile dans le marc de café épuisé dépend du type de café. Le marc de café épuisé contient environ 7 à 15 % d'huile. Ces données indiquent clairement que l'huile de café épuisée est une matière première potentielle pour les biocarburants. (KARMEE, 2018).

Trois méthodes différentes : l'extraction conventionnelle, soxhlet et supercritique sont utilisées pour extraire l'huile du marc de café épuisé. La principale limitation de ces méthodes est l'utilisation de solvants organiques volatils, nocifs pour l'environnement et la santé humaine. Ainsi, le développement de méthodes d'extraction vertes est nécessaire. (KARMEE, 2018).

Dans le contexte ci-dessus, les fluides supercritiques, en particulier le dioxyde de carbone supercritique (scCO₂), sont utilisés comme solvant vert pour les réactions chimiques et à des fins d'extraction. (KARMEE, 2018).

III.06.7. Divers

Alors que le biodiesel, le bioéthanol et la combustion directe ont attiré beaucoup d'attention ces dernières années, diverses autres méthodes de production d'énergie à partir de GCS ont également été examinées, telles que la liquéfaction hydrothermale et la pyrolyse. La liquéfaction hydrothermale fait référence au processus dans lequel les structures biopolymères au sein d'une biomasse sont décomposées par exposition à de l'eau ou un solvant super ou sous-critique à des températures et des pressions élevées. Cette méthode est avantageuse car elle permet de convertir directement la biomasse en bio-huile brute, sans avoir besoin de processus de séchage. Dans les travaux antérieurs des auteurs, plusieurs tests ont été

effectués pour utiliser la liquéfaction hydrothermale pour l'extraction de bio-huile à partir de MC. La liquéfaction en solo ainsi que la co-liquéfaction avec d'autres matières premières ont été examinées. Il a été constaté que la liquéfaction hydrothermale du MC fournit un rendement élevé en bio-huile brute de 47,3 % en masse, tout en améliorant également le pouvoir calorifique supérieur (HVH) de 20,2 à 31 MJ/kg. Dans d'autres tests, la combinaison de MC avec un filtre en papier, une tige de maïs ou des microalgues s'est avérée avoir des effets synergiques positifs qui ont conduit à une augmentation du rendement en huile et à une amélioration des propriétés de la bio-huile. (MCNUTT et HE, 2019).

La pyrolyse est une autre méthode populaire pour produire de la bio-huile brute à partir de MC. Il décrit le processus simple de décomposition des matériaux par décomposition thermique. Environ 60 % des produits sont généralement sous forme liquide, majoritairement huileuse. Des chercheurs ont examiné l'effet de la température de pyrolyse sur le rendement en huile, le HHV, la viscosité et la teneur en eau. Le rendement optimal en huile de 54,85 % a été obtenu à 823 K, et avait un HHV plus élevé que les huiles de pyrolyse dérivées de biomasses « ligneuses ». Des chercheurs ont examiné l'impact du CO₂ sur la pyrolyse. Ils ont découvert qu'une augmentation du CO₂ accélère le craquage thermique et réagit avec les composés organiques volatils (COV) dans le mélange. Cela rend également le biochar produit plus poreux, ce qui pourrait être utile dans l'amendement du sol car il favorise la croissance bactérienne et fongique. Des chercheurs ont produit de l'huile de pyrolyse avec un bon rendement, un pouvoir calorifique élevé et une faible teneur en eau en utilisant des conditions de conversion à basse température (380 °C) pour la pyrolyse. Cependant, la viscosité de l'huile devrait être améliorée afin d'être utilisée comme carburant alternatif. (MCNUTT et HE, 2019).

Le diagramme suivant résume quelques applications dans le domaine de l'environnement et de l'énergie.

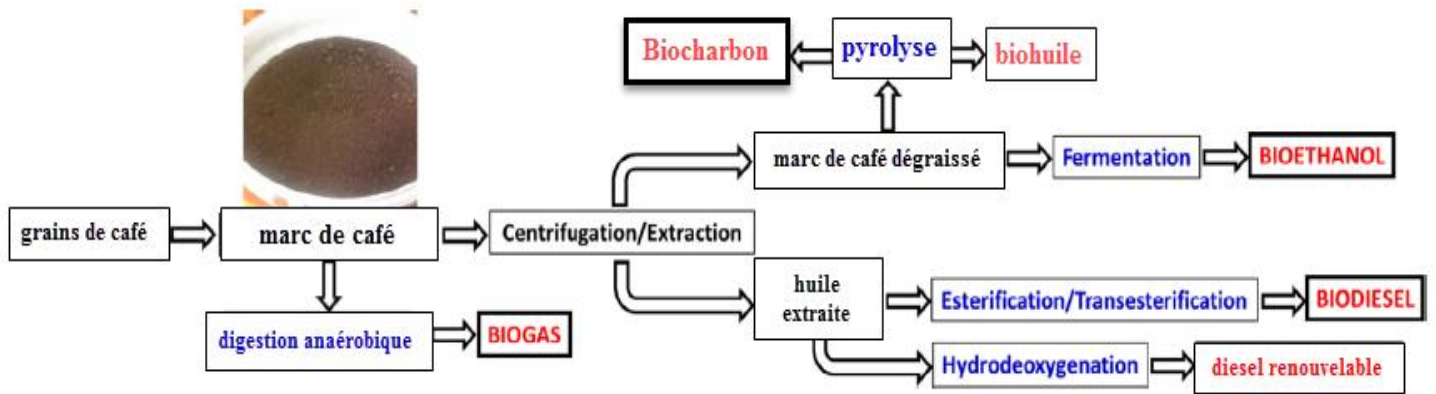


Figure III.04 : Production de bioéthanol, biodiesel, bio-huile, biocharbon, diesel renouvelable et biogaz du MC (KARMEE, 2018)

III.07. Conclusion

Le café est l'une des boissons les plus consommées au monde ; et il est le deuxième produit commercialisé au monde derrière le pétrole.

La production, la transformation et la consommation du café génèrent des quantités de déchets et de résidus liquides et solides,

Parmi ces déchets figure le marc de café ; qui est un résidu causant des dégâts à l'environnement (sol et eau).

D'après les résultats de l'étude bibliographique de ce chapitre nous pouvons constater que le résidu du marc de café de par sa composition chimique varié et riche et ses caractéristiques physicochimiques, peut être utilisé comme ressource quasiment gratuite pour la production de biocarburants et de composés chimiques et par conséquent permet d'opter pour des solutions de valorisation à forte valeur ajoutée dans des domaines aussi divers que l'alimentaire, l'agronomie, l'environnement, l'énergie, les matériaux, la nutraceutique, pharmacie...

Suite à sa composition biochimique, une étude toxicologique et écotoxique s'impose avant toute utilisation potentielle.

Jusqu'à présent, la plupart des techniques de valorisation du marc de café sont réalisées à l'échelle de laboratoire. Les recherches futures doivent se canaliser sur une étude technico-économique de la production de biocarburants et de produits chimiques à l'échelle industrielle.

Une étude plus approfondie de la composition moléculaire du marc de café et de leurs fonctionnalités est nécessaire, pour opter pour telle ou telle application. Enfin les différents types de valorisation doivent se réaliser dans le cadre du développement durable et de la protection de l'environnement.

Liste des références bibliographiques

1. **ADI A.J. ET NOOR Z.M., 2009** - Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresource Technology.*, 100: 1027-1030.
2. **ATABANI A.E., IMTIAZ A., NAQVI S.R., BADRUDDIN I.A., ASLAM M., MAHMOUD E., ALMOMANI F., JUCHELKOV´A D., ATELGE M.R. ET KHAN T. M. Y., 2022** - A state-of-the-art review on spent coffee ground (SCG) pyrolysis for future biorefinery. *Chemosphere.*, 286 :131- 730.
3. **BALLESTEROS L.F., TEIXEIRA J.A. ET MUSSATTO S.I., 2010** - Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silver skin. *Food Bioprocess Technol.*, 7: 3493-3503.
4. **BALLESTEROS L.F., TEIXEIRA J.A. ET MUSSATTO S.I., 2014** - Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food Bioprocess Technol.*, 7:3493- 3503.
5. **CAMPOS R.C., PINTO V.R.A, MELO L.F., ROCHA S.J.S. ET COIMBRA J.S., 2021** - New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater ”and other by-products: A critical review . *Future Foods.*, 4:100058.
6. **CARASSOU .F., 2015-** *une récupération spécifique du marc de café aurait-elle une plus-value pour la communauté.* Essai, maîtrise en environnement Univ. DE SHERBROOKE .103p
7. **COSTA M. C., LIMA T. F. O., ARCARO C. A., INACIO M. D., BATISTA-DUHARTE A. et CARLOS I. Z., 2020** -Trigonelline and curcumin alone, but not in combination, counteract oxidative stress and inflammation and increase glycation product detoxification inthe liver and kidney of mice with high-fat diet-induced obesity. *The Journal of Nutritional Biochemistry.*, 76:108303.
8. **CRUZ R., MENDES E., TORRINHA A., MORAIS S., PEREIRA J.A., BAPTISTA P. ET CASAL S., 2015** - Revalorization of spent coffee residues by a direct agronomic approach. *Food Research International.*, 73: 190-196.
9. **DUARTE G. S., PEREIRA A. A. ET FARAH, A., 2010** - Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. *Food Chemistry.*, 118:851–855.
10. **FERNANDES E. M., DAMASCENO G. A., FERRARI M., et AZEVEDO E. P. (2015)** - Dissolutionenhancement of caffeine in the ammonium

acryloyldimethyltaurate/vp copolymer base: *Pharmaceutical development of anti-cellulite gels* ., (36): 69–75.

11. GARCIA-GUTIERREZ N., MALDONADO-CELIS M., ROJAS-LOPEZ M., LOARCA-PINA G.F., CAMPOS-VEGA R. ET FUNCT J., 2017 - *Foods*., 30 : 237.
12. GOMEZ-DE LA CRUZ F.J., CRUZ-PERAGON F., CASANOVA-PELAEZ P.J. ET PALOMAR-CARNICERO J.M. (2015) - A vital stage in the large-scale production of biofuels from spent coffee grounds: The drying kinetics. *Fuel Processing Technology*., 130: 188-196.
13. GONZALEZ A.S., PLAZA M.G., PIS J.J., RUBIERA F. ET PEVIDA C., 2013 - Post-combustion CO₂ capture adsorbents from spent coffee grounds. *Energy Procedia*., 37: 134-141.
14. KARMEE S.K., 2018 - A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and bio composites. *Waste Management*., 72:240–254.
15. KOSTENBERG D. ET MARCHAIM U., 2008 - Anaerobic digestion and horticultural value of solid waste from manufacture of instant coffee. *Environnemental Technology*., 4: 973-980.
16. KOVALCIKA A., OBRUCA S. ET MAROVA I.B., 2018 - Valorization of spent coffee grounds: A review. *Food and Bioproducts Processing*., 110:104 -119.
17. LIMOUSY L., JEGUIRIM M., DUTOURNIÉ P., KRAIEM N., LAJILI M. ET SAID R., 2013 - Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, 107: 323-329.
18. LIU K. ET PRICE G.W., 2011 - Evaluation of three composting systems for the management of spent coffee grounds. *Bioresource Technology*., 102: 7966-7074.
19. LONE A, N., MALIK A, T., NAIKOO H, S., RAGHU R, S. ET TASDUQ, S. A., 2020 - Trigonelline, anaturally occurring alkaloidal agent protects ultraviolet-B (UV-B) irradiation induced apoptotic cell death in human skin fibroblasts via attenuation of oxidative stress, restoration of cellular calcium homeostasis and prevention of endoplasmic reticulum (ER) stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*., 202:111720.
20. MCNUTT J .et HE Q S., 2019 - Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*., 71 : 78–88.

21. MELO M.M.R., BARBOSA H.M.A., PASSOS C.P. ET SILVA C.M., 2014 - Supercritical fluid extraction of spent coffee grounds: Measurement of extraction curves, oil characterization and economic analysis. *The Journal of Supercritical Fluids.*, 86: 150-159.
22. MURTHY P. S. ET NAIDU M., 2012- Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling.*, 66: 45-5.
23. MUSSATTO S.I., MACHADO E.M.S., MARTINS S. ET TEIXEIRA J.A., 2011 - Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food Bioproc. Tech.*, 4: 661–672.
24. NUGRAHINI A. D., ISHIDA, M., NAKAGAWA T., NISHI, K. ET SUGAHARA T. 2020 -Trigonelline: An alkaloid with anti-degranulation properties. *Molecular Immunology.*, 118: 201–209.
25. OBRUCA S., BENESOVA P., KUCERA D., PETRIK S.ET MAROVA, I., 2015- Biotechnological conversion of spent coffee grounds into polyhydroxyalkanoates and carotenoids. *New Biotechnol.* 32 : 569–574.
26. OBRUCA S., PETRIK, S., BENESOVA P., SVOBODA Z., EREMKA L. ET MAROVA I., 2014 - Utilization of oil extracted from spent coffee grounds for sustainable production of polyhydroxyalkanoates. *Appl Microbiol. Biotechnol.*, 98 : 5883–5890.
27. OSORIO-ARIAS J., DELGADO-ARIAS S., CANO L., ZAPATA S., QUINTERO M., NUNEZ H., RAMIREZ C., SIMPSON R. AND VEGA-CASTRO O., 2020 - Sustainable Management and Valorization of Spent Coffee Grounds through the Optimization of Thin Layer Hot Air-Drying Process. *Waste and Biomass Valorization.*, 11:5015–5026 .
28. PESHEVA D., MITEVB D., PEEVAC L. ET PEEVA G., 2018 - Valorization of spent coffee grounds – A new approach. *Separation and Purification Technology.*, 192:271–277.
29. PETRICK S., OBRUCA S., BENESOVA P. ET MAROVA I., 2014- **BIOCONVERSION** of spent coffee grounds into carotenoids and other valuable metabolites by selected red yeast strains. *Biochemical Engineering Journal.*, 90: 307-315.

30. ROSADO, C., TOKUNAGA, V. K., SAUCE, R., DE OLIVEIRA, C. A., SARRUF, F. D., PARISE-FILHO, R., 2019 - Another reason for using caffeine in dermocosmetics: Sunscreenadjuvant. *Frontiers in Physiology*, p10.
31. SABERIAN M., LI J., DONNOLI A., BONDERENKO E., OLIVA P., GILL B., LOCKREY S. ET SIDDIQUE R ., 2021 - Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review . *Journal of Cleaner Production.*, 289 : 125837.
32. SAMPAIO A., DRAGONE G., VILANOVA M., OLIVEIRA J.M., TEIXEIRA J.A. ET MUSSATTO S.I – 2013., Production, chemical characterization, and sensory profile of a novel spirit elaborated from spent coffee ground. *LWT - Food Science and Technology.*, 54: 557-563.
33. SANTOS E.M., DE MACEDO L.M., TUNDISI L.L., ATAIDE J.A., CAMARGO G.A., ALVES R.C., OLIVEIRA M.B.P.P. ET MAZZOLA P.G., 2021 - Coffee by-products in topical formulations: A review. *Trends in Food Science & Technology.*, 111: 280–291.
34. SANTOS E.M., MACEDO L.M., TUNDISI L.L., ATAIDE J.A., CAMARGO G.A., ALVES R.C., OLIVEIRA M.B. ET MAZZOLA P.G .,2012 - Coffee by-products in topical formulations: A review . *Trends in Food Science & Technology.*, 111: 280–291.
35. SILVA M.A., NEBRA S.A., MACHADO M.J.M. ET SANCHEZ C.G., 2012 - The use of biomass residues in the brazilian soluble coffee industry. *Biomass and bioenergy.*, 14: 457-467.
36. SOMNUK K., EAWLEX P. ET PRATEEPCHAIKUL G., 2017 - Optimization of coffee oil extraction from spent coffee grounds using four solvents and prototype-scale extraction using circulation process. *Agriculture and Natural Resources.*, 51: 181-189.
37. ZAMORA A.J., PASTORIZA S. ET HENARES J.A.R., 2015 - Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobialand antioxidant properties. *LWT - Food Science and Technology.*, 61: 12-18.
38. ZUORRO A., LAVECCHIA R., 2012 - Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy. *Journal of Cleaner Production.*, 34 : 49-56.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a eu comme objectif d'exposer la problématique de la valorisation des déchets et sous-produits de l'industrie agroalimentaire en générale et du déchet du marc de café tout particulièrement ; et ceci à travers des études bibliographiques tirées de la littérature scientifique.

Le premier volet représente le premier chapitre ; et se divise en deux parties et est consacré à la valorisation dans la filière de l'IAA :

- La première est consacrée aux différents types déchets et sous-produits générés par la filière agroalimentaire;
- La deuxième partie traite des différentes voies de valorisation utilisées à travers le monde.

Le second volet représente le deuxième chapitre et est consacré à une étude bibliographique très sommaire relative au caféier et au café :

Ce chapitre se divise en deux parties :

- ✨ La première partie traite d'une façon sommaire de la botanique et de l'agronomie du caféier, ainsi que de la biochimie du café ;
- ✨ La deuxième partie présente une synthèse non exhaustive des déchets engendrés par la récolte, la transformation et la consommation du café.

Le troisième volet représente le troisième chapitre est une revue bibliographique non exhaustive des différents types de valorisation du marc de café.

Ce chapitre s'articule sur deux volets :

- ✚ Le premier volet est consacré aux différents types de valorisations de l'industrie Agroalimentaire et du marc de café;
- ✚ Le deuxième volet est consacré à une synthèse bibliographique approchée sur l'adsorption des colorants sur le marc de café.

D'après l'étude réalisée, nous pouvons constater qu'il existe différentes possibilités de gestion des résidus des activités agronomiques et des industries alimentaires autres que l'incinération ou la décharge ; il s'agit en particulier de la valorisation, qui est un concept relativement récent. Les déchets des sous-produits des fruits, des légumes, des céréales et des abattoirs, après transformation peuvent

être utilisés dans les secteurs agronomique, alimentaire, santé, environnement, alimentation animale, matériaux et énergie.

L'étude a montré que le marc de café ; résidu, caractérisé par une composition chimique varié et riche et par son abondance, n'est plus considéré comme un déchet, mais plus comme une mine d'or pour la production de biocarburants et de composés chimiques et par conséquent permet d'opter pour des solutions de valorisation à forte valeur ajoutée dans des domaines aussi divers que l'alimentaire, l'agronomie, l'environnement, l'énergie, les matériaux, la nutraceutique, pharmacie...

Le marc de café. Souvent considéré à tort comme un déchet, c'est en réalité une mine d'or. En effet, sa composition chimique, riche et variée, permet d'envisager des solutions de valorisation à forte valeur ajoutée dans des domaines aussi divers que l'énergie, les matériaux, la nutraceutique, la cosmétique...

Au terme de cette recherche bibliographique nous tenons à indiquer que cet examen des possibilités de valorisation du marc de café reste préliminaire. Il est utile d'approfondir cette approche de la gestion des déchets.

Le présent travail est loin de venir à bout des buts assignés et à la lumière des informations obtenues, il est préférable de prolonger et de compléter cette étude par des approches plus approfondies portant sur les sujets suivants :

- ✚ L'analyse physicochimique du marc de café;
- ✚ Etude statistique de la consommation du café à travers les différentes Wilayas ;
- ✚ Création de banque de données scientifiques concernant la valorisation des sous produits et déchets agronomiques et agroalimentaires ;
- ✚ Réalisation de tests de toxicité et d'écotoxicité ;
- ✚ Optimisation des techniques d'extraction et de purification ;
- ✚ Mettre en œuvre les applications de ce biodéchet dans le domaine, agroalimentaire, environnemental, industrielle, biotechnologique ...
- ✚ Etude technico-économique de la faisabilité de valorisation du marc de café...

ملخص:

تولد أنشطة الصناعات الغذائية الزراعية كميات كبيرة من المنتجات الثانوية والنفايات ، والتي لها تأثير بيئي واجتماعي اقتصادي سلبي ، من ناحية ، ومن ناحية أخرى ، تمثل هذه المخلفات بعد المعالجة والتحويل إمكانات هائلة للمواد الخام لتطبيقات متنوعة ومتنوعة. من بين هذه النفايات تفل القهوة ؛ نظراً لوفرة هذه المادة وتركيبها الكيميائي ، يمكن تقييمها واستخدامها في مختلف القطاعات مثل الصحة والغذاء والزراعة والطاقة والمواد والكيماويات. تقدم هذه الدراسة اختصاراً جغرافياً غير شامل لإمكانيات استعادة المواد والطاقة من نفايات القهوة وتطبيقاتها المختلفة. يمكن أن يؤدي تطبيق التقنيات المبتكرة مثل التكنولوجيا الحيوية والكيمياء الخضراء ومبادئ التنمية المستدامة والاقتصاد الحيوي الدائري إلى تحسين الأساليب الحالية وإنشاء أساليب جديدة.

الكلمات المفتاحية: الصناعات الغذائية الزراعية ، تفل القهوة ، النفايات ، المنتج الثانوي ، التثمين .

Résumé :

Les activités des industries agroalimentaires génèrent de grandes quantités de sous-produits et de déchets, qui ont un impact environnemental et socioéconomique négatif, d'une part et d'autre part ces résidus après traitement et transformation représentent un potentiel énorme de matières premières pour des applications divers et variés. Parmi ces déchets figure le marc de café ; de part son abondance et sa composition chimique, il peut être valorisé et utilisé dans divers secteurs comme, la santé, l'alimentation, l'agriculture, l'énergie, les matériaux et la chimie. Ce travail présente une sélection bibliographique non exhaustive des possibilités de valorisation matière et énergie du déchet du marc de café et leurs applications diverses. L'application des techniques innovantes comme la biotechnologie, la chimie verte et les principes du développement durable et de la bioéconomie circulaire peuvent améliorer les méthodes actuelles et créer d'autres.

Mots clés : IAA, Marc de café, Déchet, Sous-produit, Valorisation.

Abstract

The activities of the agro-food industries generate a large quantities of by-products and waste, which have a negative environmental and socioeconomic impact, on the one hand and on the other hand these residues after treatment and transformation represent an enormous potential of raw materials for various and varied applications. Among this waste is coffee grounds; Due to its abundance and chemical composition, it can be valued and used in various sectors such as health, food, agriculture, energy, materials and chemicals. This study presents a non-exhaustive bibliographical selection of the possibilities for material and energy recovery from coffee grounds waste and their various applications. The application of innovative techniques like biotechnology, green chemistry and the principles of sustainable development and circular bioeconomy can improve current methods and create new ones.

Keywords: Agro-food industry, Coffee grounds, Waste, by-product, Valorization.