

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université D^r. Tahar Moulay SAIDA

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Génie des procédés



جامعة د الطاهر مولاي سعيدة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم : هندسة الطرائق

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme Master

En Génie des procédés

Option: Génie des procédés des matériaux

Présenté par :

SETTOUTI Aounallah

Valorisation du Marc de Café

Soutenu le : 07/07/2025

Devant le jury :

Mr. B. GUEZZEN

Maître de Conférences A Université de Saida **Président**

Mme. M TOUHAMI

Maître de Conférences B Université de Saida **Examinateuse**

Mr. A. BENHELIMA

Maître de Conférences A Université de Saida **Rapporteur**

Promotion : 2024-2025

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier **Allah** de m'avoir, aidé et éclairé mon chemin.

J'exprime mon profond remerciements et mes vives reconnaissances à :

Dr. A. BENHELIMA pour les directives précieuses Qu'il m'a consacré afin d'améliorer ce
modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres de jury

Dr. B. GUEZZEN et **Dr. M. TOUHAMI**

D'avoir accepté d'évaluer notre modeste travail.

J'exprime ma reconnaissance à **Dr M. BOUDINAR** responsable de notre spécialité et Madame
O. BELARBI chef du département pour leur soutien moral et leurs encouragements constants.

Nous remercions vivement le **Pr M. TERRAS** de la Faculté des Sciences de la Nature et de la
Vie et le **Dr. R. BERBER** de la Faculté des Sciences et Technologie de l'université de Saida
pour leur grande contribution à la réalisation de ce mémoire.

En fin, mes sincères gratitude à tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant ce cursus
Universitaire et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sans oublier nos collègues de laboratoire

Merci à tous

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ma **Mère**, le symbole de tendresse, qui a œuvré pour ma réussite par son amour, Son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils. Pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, je lui exprime mes sentiments d'éternelle gratitude à travers ce travail, aussi modeste soit-il.*

*Je dédie ce modeste travail également mon **Père** qui m'a encouragé, soutenu et protégé. Puisse Dieu, Le Tout-Puissant, Vous préserve, vous accorde santé, longue vie et bonheur.*

A. SETTOUTI

LISTE DES ABREVIATIONS

m	Mètre
mm	Millimètre
°C	Degré Celsius
%	Pourcentage
µm	Micromètre
g	Gramme
cm³	Centimètre cube
kJ	Kilo joule
Kg	Kilogramme
kcal	Kilocalorie
Km	Kilomètre
MC	Marc de café
MS	Matière sèche
MO	Matière organique
MM	Matière minérale

Liste des Figures

<i>Numéro</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Chapitre I : Généralités sur le Café</i>		
1	Quantités de café exportées (a) et importées (b) sous forme de grains dans le Monde de Décembre 2020 à Novembre 2021	4
2	Caféier et cerises de l'espèce <i>Coffea arabica</i>	6
3	Caféier et cerises de l'espèce <i>Coffea canephora</i>	7
4	Graines des deux principales variétés du café ; Arabica et Robusta	7
5	Etapes de transformation des produits principaux du café et des sous-produits générés	10
<i>Chapitre II : Généralités sur le Marc de Café</i>		
6	Marc de café (poudre)	15
7	Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage	15
8	Possibilités de valorisation du même marc de café	20
9	L'utilisation du marc de café comme fertilisant	22
<i>Chapitre III : Matériels & méthodes</i>		

10	Carte géographique de Saida	28
----	-----------------------------	----

11	Limites géographiques de Saida	29
----	--------------------------------	----

12	Image de Marc de café	29
----	-----------------------	----

13	Image de semance de la variété <i>Laitue</i>	32
----	--	----

14	Dispositif expérimental de l'essai	33
----	------------------------------------	----

15	Schéma d'expérience	34
----	---------------------	----

16	Quelques photos de dispositif pour la quantification d'énergie libérée	36
----	--	----

Chapitre IV : Résultats & discussion

17	Spectre FTIR du Marc de café brut séché	44
----	---	----

18	Diagramme de diffraction de rayon X de (A): marc de café brute séché, (B): marc de café après carbonisation à 500 °C	45
----	---	----

19	Résultats de la conversion du marc de café en charbon	47
----	---	----

20	Résultats d'effet de fertilisation avec marc de café sur l'évolution de la croissance de (<i>Laitue</i>) selon les différents traitements	48
----	---	----

21	Photos de différents pots suite aux différents traitements avec marc de café; (A): Terre rouge agricole + Marc de café après germination, (B): Terre	50
----	---	----

	rouge agricole sans Marc de café, (C): Mélange terre de labo (terreau) et terre rouge agricole + Marc de café avant germination	
--	--	--

22	Évolution du pH en fonction du pourcentage de charbon ajouté	51
----	--	----

23	Résultats de test de valorisation du charbon comme combustible	52
----	--	----

24	Quelques photo prise de l'application nommée Plateforme (Plant-Pal)	54
----	---	----

Liste des Tableaux

<i>Numéro</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Chapitre I : Généralités sur le Café</i>		
1	Les principales différences entre arabica et robusta	8
<i>Chapitre II : Généralités sur le Marc de Café</i>		
2	Caractéristiques physique du Marc de café en fonction de l'humidité	16
3	Analyse élémentaire et composition en molécules organiques du marc de café	17
4	Les principales voies de valorisation du marc de café	20
<i>Chapitre III : Matériels & méthodes</i>		
5	Plan de test de valorisation du marc de café comme engrais.	33
6	Plan de test d'ajustement de pH du marc de café utilisé comme engrais.	35
7	Plan de test de valorisation du charbon comme combustible.	36
<i>Chapitre IV : Résultats & discussion</i>		
8	Spectre FTIR du Marc de café brut séché	42
9	Diagramme de diffraction de rayon X de (A): marc de café brute séché,	43

	(B): marc de café après carbonisation à 500 °C	
--	--	--

10	Résultats du conversion du marc de café en charbon	45
----	--	----

Annexe

11	Conversion du marc de café en charbon	65
----	---------------------------------------	----

12	Hauteurs moyennes des plants (en cm)	65
----	--------------------------------------	----

13	Résultats de test d'ajustement de pH du marc de café utilisé comme engrais	66
----	--	----

14	Résultats de test de valorisation du charbon comme combustible	66
----	--	----

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
Références bibliographiques	3

Chapitre I : Généralités sur le Café

I.1. Historique et chiffres clés	4
I.2. Description botanique	5
I.2.1. Classification	5
I.2.2. Variétés de café	5
I.2.2.1. Arabica	5
I.2.2.2. Robusta	6
I.3. De la cerise à la tasse de café : culture, procédés et sous-produits générés	8
Références bibliographiques	12

Chapitre I : Généralités sur le Marc de Café

II.1. Définition	15
II.2. Les propriétés physiques	15
II.3. Les propriétés chimiques	16
II.4. Les voies de valorisation du marc de café	19
II.4.1. Marc de café brut non traité	19
II.4.2. Marc de café traité	19

II.4.2.1. Marc de café par extraction et/ou transformation	19
Références bibliographiques	23

Chapitre III : Matériels & méthodes

III.1. Introduction	28
III.2. Situation géographique	28
III.3. Le climat	29
III.4. Collecte et préparation du marc de café (MC)	29
III.5. Analyses physico-chimiques du marc de café	29
III.5.1. Détermination de la teneur en eau (humidité)	29
III.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)	30
III.5.3. Détermination du pH	31
III.5.4. Analyse par Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)	31
III.5.5. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	31
III.6. Conversion du marc de café en charbon	31
III.7. Valorisation du marc de café comme engrais	32
III.7.1. Situation géographique	32
III.7.2. Matériel végétal	32
III.7.3. Préparation des plants	33
III.7.4. Fertilisation organique des plantes	34
III.7.5. Paramètres morphologiques	34
III.7.5.1. Cinétique de longueur	34

III.7.6. Ajustement de pH du marc de café utilisé comme engrais	34
III.8. Test de valorisation du charbon comme combustible	35
III.9. Application Intelligence Artificiel (IA)	37
III.9.1. Plateforme (Plant-Pal)	37
III.9.2. Cas d'utilisation	38
III.9.3. Etapes pour exporter V0.dev	38
III.9.4. Sécurité et protection	39
Références bibliographiques	40

Chapitre IV : Résultats & discussion

IV.1. Introduction	41
IV.2. Enquête sur terrain	41
IV.3. Analyses physico-chimiques du marc de café	43
IV.4. Analyse par Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)	44
IV.5. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	45
IV.6. Conversion du marc de café en charbon	46
IV.7. Valorisation du marc de café comme engrais	47
IV.8. Résultats d'ajustement du pH du marc de café utilisé comme engrais	51
IV.9. Test de valorisation du charbon comme combustible	52
IV.10. Application Intelligence Artificiel (Plateforme (Plant-Pal))	53
Références bibliographiques	58

Conclusion générale

62

Annexe

65

Introduction général

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, la gestion durable des déchets organiques constitue un défi majeur pour les sociétés modernes. Le regard conscient sur ce sujet met aujourd’hui en évidence deux types d’action requises [1]:

- ❖ Purifier notre environnement en utilisant d'avantage des chaînes de traitement plus efficace.
- ❖ L'utilisation des technologies propres dans l'esprit de la philosophie de développement durable et respectueux à l'environnement.

Selon les dernières statistiques de l'organisation internationale du café, la consommation mondiale de café pour l'année 2019-2020 a atteint 169 millions de sacs de 60 Kg, l'Europe représentant environ un tiers de la consommation mondiale [2], et environ la moitié de ce café est destiné à la préparation du café moulu [3]. En 2014, selon l'USDA (United States Département of Agriculture), l'Algérie est classée la 7^{ème} parmi les pays importateurs de café avec en moyenne 125 000 tonnes de café importée par année. Dans le même contexte, selon l'UGCAA (Union Générale des Commerçants et Artisans Algériens), l'Algérie est classée onzième parmi les pays consommateurs de café et la première consommatrice du café parmi les pays Africains et Arabes [4]. Cela engendre une immense quantité de déchet dont parmi cela le marc de café.

Ce dernier est un sous-produit insoluble issu de l'infusion de grains de café torréfiés. Ce résidu possède une richesse exceptionnelle en composés organiques, minéraux et bioactifs, ce qui en fait une biomasse lignocellulosique prometteuse [2]. Les méthodes de valorisation du marc de café incluent notamment: l'extraction des huiles et des polyphénols pour des usages cosmétiques ou pharmaceutiques [5, 6], d'autres recherches ont confirmé que le marc de café peut être utilisé comme agent chélateur pour augmenter la disponibilité du fer dans le sol pour les plantes [7] ou même, il existe d'autre étude sur la valorisation du marc de café comme une source appréciable de la matière grasse [8].

Le marc de café, renferme de nombreux éléments d'intérêt dont la valorisation permet d'obtenir différents produits. Par conséquent, la récupération et la valorisation du marc de café

offrent des avantages considérables sur le plan environnemental et socio-économique. En valorisant le marc de café, nous contribuons à préserver l'environnement, à promouvoir la durabilité et à exploiter de manière plus efficace les ressources disponibles. Ces avantages comprennent la réduction de la pression exercée sur les ressources naturelles, la création d'emplois et le développement de nouveaux marchés [9].

Dans ce contexte, nous avons choisi d'explorer deux voies principales: la production d'engrais à partir de marc de café et la transformation thermique en biocharbon. La réutilisation de marc de café comme amendements organiques permet non seulement de réduire la production de déchets, mais aussi d'améliorer la qualité des sols et de favoriser la croissance des cultures. Parallèlement, le charbon a été étudié non seulement comme amendement du sol, mais aussi comme source potentielle d'énergie par combustion.

Par conséquent, le présent travail est structuré en deux parties principales comportant quatre chapitres. La 1^{ère} partie est une étude bibliographique, qui se divise en deux chapitres. Le premier chapitre est consacré à une mise au point de la bibliographie par un état de l'art approfondi qui a permis d'identifier les travaux les plus pertinents, notamment ceux portant sur les propriétés physico-chimiques de café, sa composition, et les technologies de transformation. Dans le deuxième chapitre, nous avons complété l'étude bibliographique par des descriptions des propriétés du marc de café et ses usages dans divers domaines. La deuxième partie est une étude expérimentale, composée elle aussi de deux chapitres: dont le 3^{ème} chapitre décrit les protocoles expérimentaux utilisés: préparation et analyses à fin d'avoir une large vision sur le déchet objet d'étude. Tandis que le 4^{ème} chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus.

Le manuscrit sera finalisé par une conclusion générale synthétisant les résultats les plus pertinents et ouvrant les perspectives pour le développement du sujet.

Ce travail vise une contribution à la valorisation locale des déchets organiques tel que le marc de café, particulièrement en Algérie, en proposant une approche durable, simple et accessible, fondée sur une ressource locale abondante.

Références bibliographiques

- [1]. YONGQIAN, C. 2005. Décoloration et dégradation d'eau usagée de colorant par des mycètes de white Rot, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University Schanghou 200092, China.
- [2]. Zengin, G., Sinan, K. I., Mahomoodally, M. F., Angeloni, S., Mustafa, A. M., Vittori, S., & Caprioli, G. 2020. Chemical Composition, Antioxidant and Enzyme Inhibitory Properties of Different Extracts Obtained from Spent Coffee Ground and Coffee Silverskin. *Foods*, 9(6), 713.
- [3]. Ramalakshmi, K., Rao, J. M. L., Takano-Ishikawa, Y., Goto, M. 2009. Bioactivities of low-grade green coffee and spent coffee in different in vitro model systems. *Food Chemistry*, 115 (11), 79.
- [4]. Benamar, M. 2016. Valorisation de residus agricoles par la culture de deux souches de champignons comestibles du genre pleurotus (Doctoral dissertation).
- [5]. Iriondo-DeHond, A., Garcia, N. A., Fernandez-Gomez, B., Guisantes-Batan, E., Escobar, F. V., Blanch, G. P., del Castillo, M. D. 2019. Validation of coffee byproducts as novel food ingredients. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 51, 194-204.
- [6]. kamgang, N. F., Khamitova, G., Angeloni, S., Sempere, A. N., Tao, J., Maggi, F., Caprioli, G. 2020. Spent coffee grounds: A potential commercial source of phytosterols. *Food Chemistry*, 126836.
- [7]. Morikawa C. K., Saigusa, M. 2008. Recycling coffee and tea wastes to increase plant available Fe in alkaline soils. *Plant and Soil*, 304(11), 249.
- [8]. Haddoudi, M., Mellouk, H., Bejjany, B., Dani, A., Digua, K. 2014. Valorisation du marc du café: extraction de l'huile et évaluation de son activité antioxydante. *Les technologies de laboratoire*, 8(36).
- [9]. Carassou, F. 2015. Une récupération spécifique du marc de café aurait-elle une plus-value pour la communauté, Montréal: Université de Sherbrooke, 11.

PARTIE

BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I :
Généralités sur le Café

I.1. Historique et chiffres clés

De nombreuses légendes concernant l'origine et l'utilisation du café comme boisson existe, la plus connue reste celle de Kaldi [1]. Ce fameux Kaldi était un éleveur de chèvres éthiopien vers 850 après J.C qui remarqua que ses chèvres devenaient excitées en mangeant les cerises du cafier. Dès lors, un moine torréfié et fit infuser les cerises, et prépara ainsi la première boisson u café. Depuis, le café n'a cessé de se démocratiser au fil des siècles.

De nos jours, le café est l'une des boissons la plus consommée au monde. De plus, la production de grains de café progresse chaque année passant de 6,8 Million tonnes/an en 2000 à près de 10 Million tonnes/an en 2021 [2, 3]. Le Brésil est le principal pays producteur et exportateur de grains de café, suivi du Vietnam, de la Colombie ou encore de l'Indonésie (Figure 1). De l'autre coté, les Etats-Unis, l'Allemagne, l'Italie et la France sont les principaux importateurs de grains de café (Figure I.1).

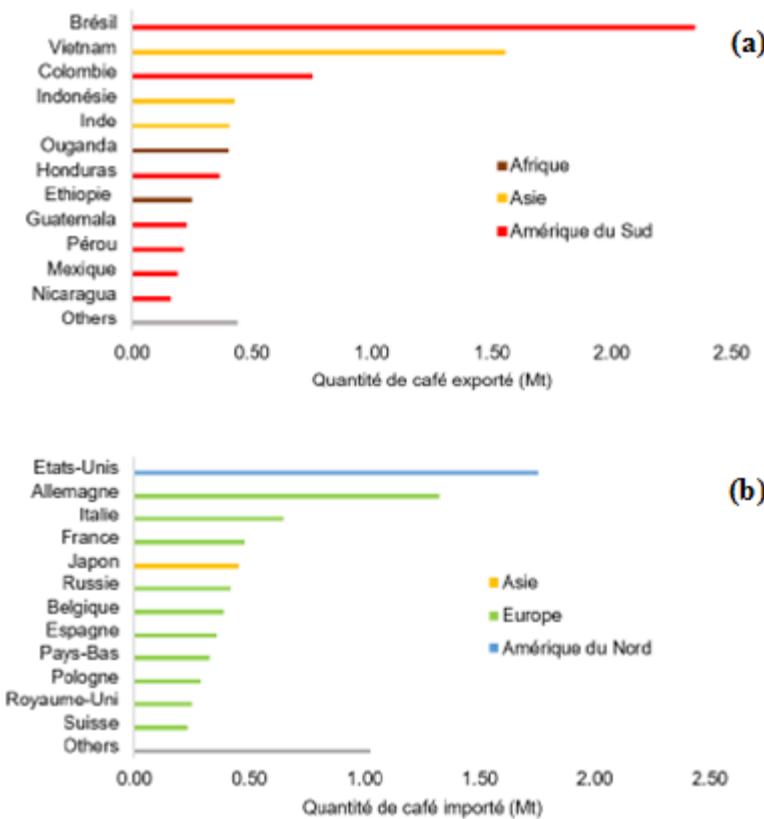


Fig. I.1 : Quantités de café exportées (a) et importées (b) sous forme de grains dans le Monde de Décembre 2020 à Novembre 2021 [2].

L'entièreté du café importé n'est pas consommée par les habitants du pays importateur, puisqu'une partie des grains de café est réexportée, notamment après des étapes de torréfaction et de décaféination. C'est par exemple le cas en Allemagne qui réexporte près de 0,83 Million tonnes sur les 1,32 Million tonnes importés en 2021. Cependant, l'importation massive de café par les pays du Nord de l'Europe rend cette ressource et ses sous-produits facilement accessibles et disponibles en Europe.

I.2. Description botanique

Le café, c'est le fruit du cafier, un arbuste tropical, il comporte plus de 6000 espèces, mais le genre *coffea* appartenant à la famille Rubiaceae, comprend 10 000 espèces à l'échelle mondiale. A Madagascar sur 661 seulement 124 ont encore été identifiés jusqu'à aujourd'hui, et parmi ces 124 espèces, deux (02) d'entre eux sont les plus exploitées, il s'agit du *Coffea arabica*. L (Arabica) et le *Coffea canephora* (Robusta). Il existe deux familles de cafier : la famille *Rubiaceae* et la famille *Percit Ixoroideae*. Le *coffea arabica* ainsi que le *coffea robusta* proviennent de la famille Rubiaceae, dans la tribu *Coffea*, du genre et sous genre *coffea* [4, 5].

I.2.1. Classification

Le cafier est un arbuste du genre *Coffea* représenté par 120 espèces [6].

Sa classification botanique est la suivante [7] :

Classe : Dicotyledoneae.

Sous-classe : Sympetalae ou Metachlamydeae.

Ordre : Rubiales.

Famille : Rubiaceae.

Genre : Coffea

I.2.2. Variétés de café

Le café est une boisson extraite du noyau du fruit qui pousse sur le cafier, du genre *Coffea*, Il existe plus de 120 espèces, mais seules deux sont majoritairement consommées :

I.2.2.1. Arabica

A pris son nom de l'espèce *Coffea arabica* (Figure I.2), c'est un arbuste aux feuilles de forme elliptiques qui ont un pétiole court, persistantes vert brillant et glomérules de fleurs blanches, un fruit rouge vif ou pourpre [8]. Le café Arabica a d'abord été utilisé à cause de ses vertus médicinales et stimulantes à l'état sauvage en Ethiopie de la région de Cafa. Il a été cultivé pour la première fois au Yémen, où il a été consommé en tant que boisson. Le café Arabica est

autogames avec différents degrés de pollinisation croisée naturelle, Les cafiers Arabica sont tétraploïdes. Les meilleurs cafés du monde sont produits uniquement à partir de grains de café 100% Arabica et sont donc beaucoup plus chers que les mélanges contenant des grains de café Robusta [9].



Fig. I.2: Cafier et cerises de l'espèce *Coffea arabica*

L'Arabica se distingue par sa teneur modérée en caféine (entre 0,8 et 1,5%), cette variété du café représente près de 70% du café produit dans le monde, Pouvant atteindre six mètres de hauteur, cette variété est généralement taillée pour ne pas excéder trois mètre. Il a un goût plus délicieux et un prix est 50% plus cher que Robusta [10], Ses arômes riches sont sensibles à la chaleur et à l'humidité. Le café Arabica est une boisson plus douce, plus fruitée et acidulée [11], Son grain ovale se caractérise par un sillon en « S » au centre et fourni d'une tunique propre, l'embryon que renferment ces coques est très-mince et se dessèche facilement. Arabica est considéré comme le plus noble de tous les cafiers, il est cultivé entre 600 et 2 000 mètres d'altitude à des températures rarement au-dessous de 15 °C dans la zone intertropicale (Amérique du Sud, Amérique Centrale et quelques pays d'Afrique et d'Asie) [12].

I.2.2.2. Robusta

Coffea canephora correspond à celle du café Robusta, tient son nom de sa caractéristique « la robustesse », originaire du Congo où elle a été découverte au XVIII^{ème} siècle, Elle représente environ 25% de la production mondiale. *Coffea canephora* prospère dans les régions plus chaudes, plus adaptées aux plaines intertropicales [13], elle est largement répandue dans les

régions tropicales, notamment en Amérique centrale et en Amérique du Sud (Brésil et Colombie). Le caféier Robusta est plus facile à cultiver, il peut atteindre une dizaine de mètres et résiste à de conditions météorologiques extérieures et même des insectes. Robusta a un arôme moins développé, un goût plus amer et plus corsé que l'Arabica car il contient deux fois plus de caféine. Ses feuilles nervurées vert foncé brillant, des fleurs blanches striées de brun et un fruit ovale rouge/brun plus petit que chez *Coffea arabica* (Figure I.3).



Fig. I.3: Caféier et cerises de l'espèce *Coffea canephora*

Le café Robusta a été caractérisé comme un café neutre, à saveur faible et parfois avec une amertume forte et prononcée [11]. *Coffea canephora* est considérée comme plus acide mais plus résistante aux fléaux [12]. Les grains de *Coffea canephora* sont généralement de couleur brune claire, de forme arrondie, plus petits, plus ronds avec une coupe centrale plus serrée que ceux de *Coffea arabica* (Figure I.4).



Fig. I.4 : Graines des deux principales variétés du café ; Arabica et Robusta [14].

Les principales différences entre les deux espèces de café arabica et robusta sont illustrées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Les principales différences entre arabica et robusta [15, 16].

Paramètres	Arabica	Rubusta
<i>Nom botanique</i>	<i>Coffea arabica</i>	<i>Coffea canephora</i>
<i>Date de description de l'espèce</i>	1753	1895
<i>Altitude de culture (m)</i>	1000 à 2000	0 à 700
<i>Température (°C)</i>	15 à 24	20 à 30
<i>Pluviométrie (mm)</i>	1500 à 2000	1500 à 2000
<i>Forme</i>	Plate	Ovale
<i>Délai de floraison-récolte (mois)</i>	9	10 à 11
<i>Teneur en caféine (%)</i>	0,8 à 1,4	1,7 à 4
<i>Première floraison (ans)</i>	4 à 5	2 à 3
<i>Goût</i>	Acide	Amer

I.3. De la cerise à la tasse de café : culture, procédés et sous-produits générés

Le café *Arabica* du Brésil et des pays d'Amérique du Sud représente environ 75% de la production mondiale tandis que le café *Robusta* du Vietnam et des pays africains représente les 25% restants. Les conditions de culture de leurs arbres sont différentes puisque le caféier *Arabica* a besoin d'ombre et de températures douces, tandis que le caféier *Robusta* peut résister à des conditions difficiles de températures et d'humidité. Le choix de l'espèce cultivée influence directement la composition chimique du café obtenu. Cependant, les procédés pour passer de la cerise à la tasse sont similaires.

Après la collecte manuelle ou mécanique des cerises de café, trois grandes étapes sont nécessaires pour obtenir la boisson de café : [17, 18]

- ❖ Le dépulpage,
- ❖ La torréfaction,
- ❖ L'infusion.

La récolte du café va également mener à la génération d'un premier sous-produit de cette culture : les feuilles de caféier [19]. Ces feuilles de caféier sont traditionnellement valorisées en les faisant infuser pour obtenir une boisson chaude.

Le **dépulpage** peut se réaliser *via* deux méthodes : par voie sèche ou par voie humide [20]. Le procédé par voie sèche est le plus ancien et le moins coûteux. Il consiste à sécher en extérieur au soleil pendant 4 semaines l'entièreté de la cerise pour abaisser la teneur en eau autour des 12,5 % massique. Les grains séchés sont ensuite décortiqués afin de retirer l'enveloppe du café, qui forme le sous-déchet appelé cosse de café et qui fait l'objet de nombreux travaux de recherche présentés dans la littérature concernant sa valorisation [21, 22]. Le procédé par voie humide est réalisé à l'aide d'un dépulpeur pour retirer la pulpe de la cerise fraîche, qui forme un sous-déchet appelé cascara, valorisé notamment sous forme de boissons [23, 24]. Les grains sont ensuite mis dans un fermenteur pour provoquer la dégradation du mucilage par des enzymes pendant 24 à 36 heures avant d'être séchés au soleil.

Une étape cruciale est nécessaire pour que le grain de café vert qui est inodore et sans goût révèle ses arômes connus de tous : la torréfaction. La torréfaction consiste à pyrolyser le grain de café vert entre 200 et 250 °C pendant 0,75 à 20 minutes [25, 26]. Ce procédé va permettre de récupérer le grain torréfié d'un côté et son sous-produit qui est la pellicule argentée en surface appelé « coffee silverskin » de l'autre. La composition du grain de café évolue après cette étape puisque des mélanoïdines seront formées suite à la réaction de Maillard, qui est une réaction de glycation des protéines impliquant les polysaccharides, protéines et acides chlorogéniques du café [27, 28]. En effet, les acides chlorogéniques font parties intégrantes des mélanoïdines via une transglycosylation non-enzymatique durant la torréfaction [29]. Bien que la torréfaction soit une étape obligatoire, elle induit également des effets néfastes comme la dégradation des acides chlorogéniques en lactones d'acides chlorogéniques ou la formation de molécules potentiellement cancérogènes comme l'acrylamide, l'alcool furfurylique et le 5-HMF ou encore la dispersion de polluants atmosphériques comme les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques [30-33].

Le grain torréfié est moulu avant la dernière étape : l'infusion. La préparation de la boisson peut s'effectuer de trois manières différentes : décoction, infusion et sous pression. De ce fait, de nombreux cafés existent comme le café Turque, par percolation, par filtre, café Napolitain, café Plunger, café Moka et espresso [34]. La méthode d'infusion va fortement influencer la qualité de la boisson de café, par conséquent, la composition du sous-produit de cette étape qu'est le marc de café [35]. Café espresso (de l'italien espresso, extrait par pression ou très vite), ou café express, est un café très corsé avec un fort arôme, obtenu en faisant passer rapidement de l'eau chaude sous une pression de 1 bars et un temps de passage de 22-28 s à travers du café finement

moulu et torréfié. Cette opération se fait à l'aide d'une cafetière à expresso. Le procédé utilisé permet à l'eau et à la mouture d'avoir un contact minimum, ce qui évite de diluer les saveurs et les arômes. L'intérêt économique et environnemental diffère selon le sous-produit du café et ses voies de valorisation, dépendant de la composition chimique, de la quantité et de la localisation du sous-produit (Figure I.5) [18].

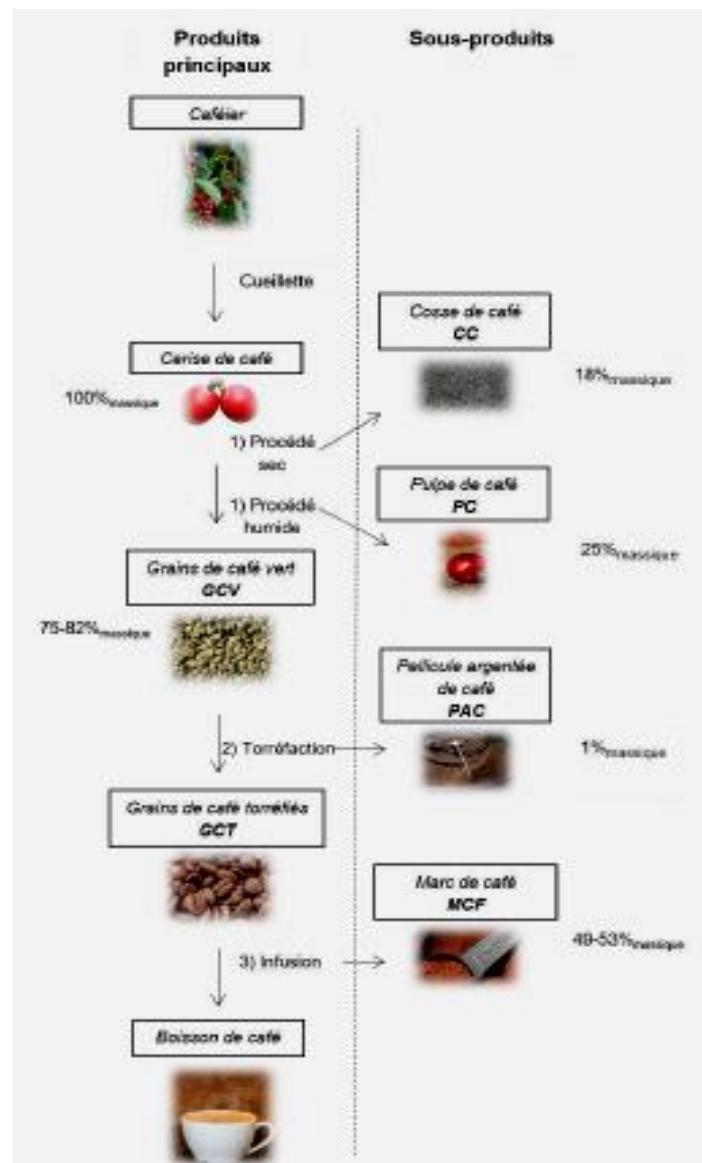


Fig. I.5 : Etapes de transformation des produits principaux du café et des sous-produits générés.

Le marc de café suscite l'intérêt des chercheurs, des collectivités et des industriels puisqu'il est le principal sous-produit issu de la transformation du café, représentant près de 50 % massique du café vert. De plus, c'est une ressource accessible sur tous les continents, notamment l'Europe et l'Amérique du Nord contrairement aux feuilles, aux pulpes et aux cosses de café qui sont localisées exclusivement en Amérique du Sud, en Asie et en Afrique [36]. C'est également une ressource largement disponible contrairement à la pellicule argentée qui est un sous-produit généré exclusivement par les torréfacteurs. Pour finir, le marc de café possède une composition moléculaire riche qui fait de cette bioressource une matière première unique à valoriser.

Références bibliographiques

- [1]. Smith, R. F. 1985. In *Coffee*, Springer, 1-12.
- [2]. International Coffee Organization, <https://www.ico.org/> (Accessed 11/04/2025).
- [3]. Torga, G. N., Spers, E. E. 2020. In *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil*, Elsevier, 21-49.
- [4]. Charrier A., Berthaud, J. 1985. In *Coffee*, Springer, 13-47.
- [5]. Farah, A., dos Santos, T. F. 2015. In *Coffee in health and disease prevention*, Elsevier, 5-10.
- [6]. Mary, B., Christine, M., Catherine, A., 2001. Le grand livre du café. France: Manise. Minerva. Ed 1, 156.
- [7]. Thorn, J. 2002. Le café : le guide du connaisseur. Modus Vivendi.
- [8]. Iris, M. 2019. *Coffea arabica*. Consulté le 13/03/2025, sur <https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/cafeier,1864.html> Caféier,
- [9]. Kreicbergs, V., Dimins, F., Mikelsone, V., Cinkmanis, I. 2011. Biologically active compounds in roasted coffee. *Food BaltProceedings of the 6th*, 110-115.
- [10]. Khalid, K. 2010. Le café : Marché et tendances. Food Magazine. 19: 24-55. 24.
- [11]. Alonso-Salces, M., Serra, F., eniero, F., H berger, K. 2009. Botanical and Geographical Characterization of Green Coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*): Chemometric Evaluation of Phenolic and Methylxanthine Contents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4224–4235
- [12]. Mussatto, S. I., Carneiro, L. M., Silva, J. P., Roberto, I. C., Teixeira, J. A. 2011. A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate polymers*, 83(2), 368-374.
- [13]. Adriana, F. 2019. Coffee Consumption and Health Implications, Royal Society of Chemistry; 1st edition, 2-27
- [14]. Tokopedia. 2019. Graines des deux principales variétés du café ; Arabica et Robusta. Consulté le 8/12/2022, sur <https://www.tokopedia.com/blog/review-perbedaan-kopi-robusta-arabika/>
- [15]. Franca, B., Adriana, S., Leandro, S., Oliveira. G., 2019. « Coffee ». In *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*, 413-38. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00017-4>

- [16]. Hećimović, I., Belščak-Cvitanović, I., Horžić, D., Komes, D. 2011. Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting. *Food chemistry*, 129(3), 991-1000.
- [17]. Flament, I. 2001. *Coffee flavor chemistry*, John Wiley & Sons.
- [18]. Murthy, P. S., Naidu, M. M. 2012., *Resources, Conservation and recycling*, 66, 45-58.
- [19]. Patil, S., Vedashree M., Murthy, P. S. 2022. *Planta*, 255, 1-17.
- [20]. Subedi, R. N. 2011. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2, 181-193.
- [21]. Oliveira, L. S., Franca, A. S. 2015. *Coffee in health and disease prevention*, 283-291.
- [22]. Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., Brand, D., Mohan R., Roussos, S. 2000. *Biochemical Engineering Journal*, 6, 153-162
- [23]. Heeger, A., Kosińska-Cagnazzo, A., Cantergiani E., Andlauer, W. 2017. *Food chemistry*, 221, 969-975.
- [24]. Iriondo-DeHond, A., Elizondo, A. S., Iriondo-DeHond, M., Ríos, M. B., Mufari, R., Mendiola, J. A., Ibañez E., Del Castillo, M. D. 2020. *Foods*, 9, 620.
- [25]. Buffo, R. A., Cardelli-Freire, C. 2004. *Flavour and fragrance journal*, 19, 99-104.
- [26]. Spiller, M. A. 2019. In *Caffeine*, CRC Press, 97-161.
- [27]. Bekedam, E. K., Loots, M. J., Schols, H. A., Van Boekel M. A., Smit, G. 2008. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 7138-7145.
- [28]. Moreira, A. S., Nunes, F. M., Domingues, M. R., Coimbra, M. A. 2012. *Food & Function*, 3, 903-915.
- [29]. Moreira, A. S., Nunes, F. M., Simões, C., Maciel, E., Domingues, P., Domingues M. R. M., Coimbra, M. A. 2017. *Food chemistry*, 227, 422-431.
- [30]. Binello, A., Cravotto, G., Menzio, J., Tagliapietra, S. 2021. *Food Chemistry*, 344, 128631.
- [31]. Farah, A., de Paulis, T., Trugo, L. C., Martin, P. R. 2005. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53, 1505-1513.
- [32]. Jaiswal, R., Matei, M. F., Golon, A., Witt M., Kuhnert, N. 2012. *Food & function*, 3, 976-984.
- [33]. Lachenmeier, D. W., Schwarz, S., Teipel, J., Hegmanns, M., Kuballa, T., Walch, S. G., Breitling-Utzmann, C. M. 2018. *Toxics*, 7, 1.

- [34]. Cordoba, N., Fernandez-Alduenda, M., Moreno, F. L., Ruiz, Y. 2020. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 45-60.
- [35]. Vandeponseele, A., Draye, M., Piot, C., Chatel, G. 2021. *Clean Technologies*, 3, 335-350.
- [36]. Vandeponseele, A., Draye, M., Piot, C., Chatel, G. 2020, *Green Chemistry*, 22, 8544-8571.

Chapitre II :

Généralités sur le Marc de Café

II.1. Définition

Le marc de café (Figure II.6) est en effet considéré comme un résidu insoluble qui est produit après la consommation de café moulu [1]. Il s'agit des résidus restants des grains de café qui ont été torréfiés et moulus, puis infusés dans de l'eau chaude ou traités à la vapeur d'eau [2]. La composition chimique du marc de café est à la fois riche et variée, ce qui ouvre la possibilité de trouver des solutions de valorisation à forte valeur ajoutée dans différents domaines [3].



Fig. II.6 : Marc de café (poudre).

II.2. Les propriétés physiques

Le marc de café a un taux d'humidité qui varie entre 55% et 80% [4]. Plus l'humidité est élevée, plus la croissance microbienne est favorisée, ce qui nécessite des stratégies de conservation optimales pour obtenir un produit de qualité. Cependant, ces stratégies peuvent entraîner des coûts supplémentaires de transport [2]. La morphologie des grains du marc de café séchés varie entre 50 et 100 µm pour le marc de café commercial (Figure II.7). 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 (tableau 2).

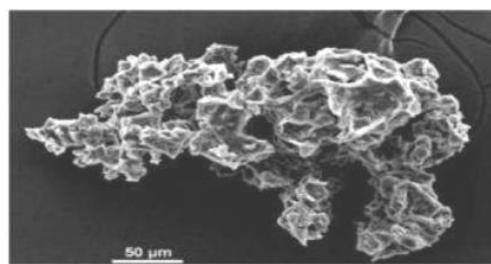


Fig. II.7 : Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage [5].

Une donnée utile pour déterminer les superficies nécessaires des aires d'entreposage du marc de café après l'avoir récupéré. L'angle de talus des grains reste constant, indépendamment de l'humidité. Cela est important pour déterminer l'espace de stockage nécessaire une fois le marc de café récupéré. Parallèlement, la densité apparente du marc de café est environ de $0,42 \text{ g/cm}^3$. Alors que la densité réelle est d'environ $1,16 \text{ g/cm}^3$ (tableau 2). Cependant, les grains du marc de café ne possèdent pas de micropores et la surface des grains est chargée négativement [6]. En général, la porosité est de $0,63 \mu\text{m}$, peu importe le taux d'humidité et la taille des pores est d'environ $10 \mu\text{m}$ [7]. Toutefois, cette porosité peut être augmentée si nécessaire en diminuant la cristallinité du marc de café en dégradant sa matrice cellulose-lignine [8].

Tableau 2 : Caractéristiques physique du Marc de café en fonction de l'humidité [9].

Humidité (%)	Angle de talus ($^\circ$)	Densité apparente (g/cm^3)	Densité réelle (g/cm^3)	Diamètre (μm)	Porosité (μm)
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 déterminé

II.3. Les propriétés chimiques

La composition du marc de café est indiquée dans le Tableau 3 [10-15]. Le marc de café est une biomasse lignocellulosique, oléagineuse et riche en polyphénols. La lignocellulose n'est autre que le matériau fibreux qui forme la structure cellulaire de la biomasse. La lignocellulose est généralement constituée d'environ 40 % de cellulose, 25 % massique d'hemicellulose et 20 % massique de lignine [16]. Le marc de café est composé principalement d'hémicellulose à hauteur de 35-40 % massique, contrairement aux autres biomasses (Tableau 3). Si la lignocellulose est le constituant majoritaire du marc de café et de la biomasse, il est difficile de la convertir en produits d'intérêt à cause de la matrice végétale difficile à déstructurer à l'aide de traitements conventionnels [17].

Cependant, pour 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. Aussi, les lipides du marc de café sont composés de 84,4 % de triglycérides [18].

Les polyphénols sont des molécules présentes dans le végétal possédant un ou plusieurs cycles aromatiques que l'on retrouve dans la nature sous forme de glycosides [19, 20].

Tableau 3: Analyse élémentaire et composition en molécules organiques du marc de café.

Analyse élémentaire		g/100g du Marc de Café
	Carbone (C)	46,4-56,1
	Hydrogène (H)	6,0-7,2
	Azote (N)	2,4-15,5
	Oxygène (O)	34,0
<i>Composition moléculaire :</i>		
<i>Organique</i>		g/100g du Marc de Café
<i>Cellulose</i>		8,6-12,4
<i>Hemicellulose</i>		36,7-39,1
	Arabinose	1,7-3,6
	Mannose	19,1-21,2
	Galactose	13,8-16,4
<i>Lignine</i>		23,9
	Insoluble	17,6
	Soluble	6,3
<i>Lipides</i>		10,5-15,9
<i>Protéines</i>		11,2-17,4
<i>Caféine</i>		0-0,5
<i>Polyphénols</i>		mg/g du Marc de Café
	Acides chlorogéniques	1,8-5,6

	Catéchines, épicatechines	0,3-0,6
	Acide caféïque	0,03-0,07
	Acide férulique	0,004-0,01
	Acide <i>p</i> -coumarique	0,01
	Acide ellagique	0,06-0,1
	Quercétine	1,0
	Rutine	0,06
 <i>Cendres</i>		1,3-1,6
 <i>Minérale :</i>		mg/kg du Marc de Café
	Potassium (K)	3549,0
	Phosphore (P)	1475,1
	Magnésium (Mg)	1293,3
	Calcium (Ca)	777,4
	Aluminium (Al)	279,3
	Fer (Fe)	118,7
	Manganèse (Mn)	40,1
	Cuivre (Cu)	32,3
	Zinc (Zn)	15,1

Les polyphénols font l'objet de nombreux travaux de recherche sur leurs propriétés uniques d'antioxydant qui permettent de combattre des maladies comme l'obésité, le diabète, les maladies du cœur. Les polyphénols peuvent être classés en grandes familles qui sont : les acides phénoliques, les flavonoïdes, les stilbènes, les anthocyanines, qui possèdent elles mêmes des sous-groupes comme les néoflavonoïdes, les isoflavones, les chalcones [21]. Les acides phénoliques, plus spécifiquement les acides chlorogéniques, sont les principaux polyphénols du marc de café [22].

Alors que pour les protéines, les études ont prouvé qu'ils sont de même ordre chez l'arabica ou le robusta et elles varient principalement entre 6,7 et 14 %. Cependant, il se peut que

ces estimations soient sur évaluées à cause de la présence d'autres composés contenant de l'azote tel que la caféine ainsi que plusieurs acides aminés. En effet, 17 acides aminés présents sont présents dans le marc de café, dont les neuf acides aminés essentiels.

II.4. Les voies de valorisation du marc de café

Les voies de valorisation du marc de café sont extrêmement diverses touchant à tous les domaines allant de la pharmaceutique, de la cosmétique, de la nutraceutique, de l'agroalimentaire, des matériaux ou encore des énergies [23]. Le marc de café peut être valorisé sous forme de marc de café brut sans transformation ou modifié *via* des processus physicochimiques.

II.4.1. Marc de café brut non traité

Cette bioressource brute pourrait être utilisée comme adsorbant à l'échelle industrielle notamment pour la dépollution d'effluents aqueux. En effet, le marc de café non traité a démontré son efficacité dans l'adsorption de polluants métalliques comme le chrome (VI) Cr^{6+} , cadmium (II) Cd^{2+} , le plomb (II) Pb^{2+} ou encore de polluants plastiques comme les nanoparticules de polystyrène [24-27].

II.4.2. Marc de café traité

Il est également possible de traiter la totalité de la matière par pyrolyse afin d'obtenir un charbon végétal appelé biochar ou par procédé hydrothermal afin d'obtenir un charbon végétal appelé hydrochar, un biocarburant liquide appelé biohuile brute et une bioénergie gazeuse appelé biogaz en parallèle [28, 29].

II.4.2.1. Marc de café par extraction et/ou transformation

Les polysaccharides de la lignocellulose peuvent être transformés en sucres fermentables par hydrolyse alcaline, acide ou enzymatique [12, 30, 31]. Ces différents procédés de saccharification peuvent également être mis en œuvre successivement afin de maximiser le rendement final [32]. Ces sucres fermentables pourront être utilisés comme substrat pour la production du bioéthanol, du biobutanol ou d'acides lactiques qui sont des bioénergies ou des intermédiaires chimique [33-37]. La production de différents biocarburants à partir du marc de café implique d'exploiter sa teneur en lipides. En effet, le pouvoir calorifique des particules en combustion produites par le marc de café est de 25240 kJ/kg, soit environ 6000 kcal/kg lorsque l'humidité est nulle (Figure II.8).

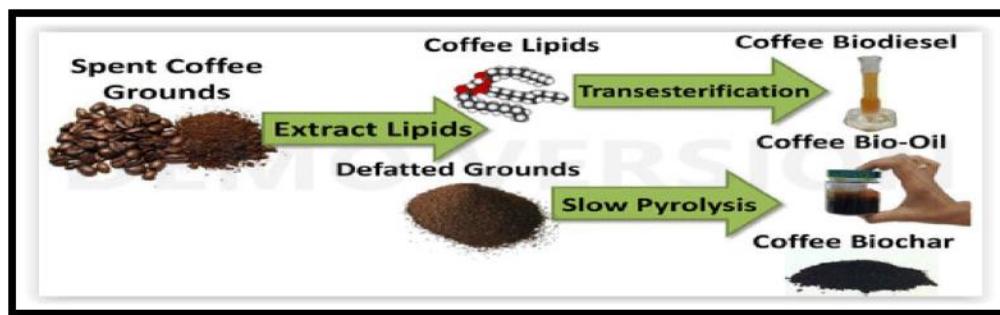


Fig. II.8 : Possibilités de valorisation du même marc de café [38].

Les lipides du marc de café peuvent être extraits et transformés en biodiesel *via* une étape de trans-estérification des triglycérides avec du méthanol pour générer des acides gras méthylés et du glycérol [39]. Cependant, grâce à ses propriétés bioactives, l'huile de marc de café gagne en valeur économique lorsqu'elle est valorisée dans le domaine de la cosmétique [40].

Les polyphénols sont extraits du marc de café pour former un extrait brut qui sera exploité tel quel comme ingrédient actif, fractionné en extrait enrichi ou en molécules pures isolées [41].

Tableau 4 : Les principales voies de valorisation du marc de café.

Fraction valorisée	Domaine d'application	Produit final	Valeur ajoutée	Source
<i>Marc de café brute</i>	Alimentation animale	Nourriture protéinée pour ruminants	+	[42, 43]
<i>Marc de café brute ou transformé</i>	Agriculture	Fertilisants, amendements pour les sols compost	+	[44, 45]
<i>Marc de café brute</i>	Agriculture	Substrat pour la culture de champignons comestibles	+	[46, 47]
<i>Marc de café transformé</i>	Matériel de construction	Remblai de route, ciment, isolant thermique	+	[48-53, 42, 43, 45, 54-56]

<i>Marc de café brute ou transformé</i>	Matériel de dépollution	Adsorbant pour polluants organiques, plastiques et métalliques	+	[24-27]
<i>Marc de café transformé</i>	Matériel de dépollution/ Energie	Biochar/ hydrochar, bio-huile brute, biogaz	++	[57, 59]
<i>Carbohydrates</i>	Energie	Bioéthanol	++	[34, 60]
<i>Lipides</i>	Energie	Biodiesel	++	[39, 61]
<i>Caféine</i>	Agroalimentaire, Pharmaceutique, Nutraceutique, Cosmétique	Ingrédients dans sodas, boissons énergisantes, antalgiques, crème amincissante	+++	[62, 63]
<i>Carbohydrates</i>	Nutraceutique	Sucres bioactifs, fibres alimentaires	+++	[64, 65]
<i>Lipides</i>	Cosmétique	Huile bioactive	+++	[66, 67]
<i>Polyphénols</i>	Nutraceutique, Cosmétique	Extraits antioxydants et anti-inflammatoires pour pilules pour la perte de poids et crème anti-âge et anti-UV	+++	[68, 69]

Dès lors, les extraits végétaux riches en acides chlorogéniques possèdent des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, anti-cancerigènes, anti-lipidémiques, anti-diabétiques et antihypertenseurs bénéfiques pour la santé qui ont fait l'objet d'investigations intensives dans le domaine de la pharmaceutique et de la nutraceutique [70, 71]. Les extraits d'acides chlorogéniques aux propriétés anti-microbiennes peuvent également être utilisés comme agent de conservation des produits alimentaires [48, 72] (tableau 4).

En industrie agroalimentaire et alimentaire, le marc de café peut être utilisé pour produire des caroténoïdes par culture de levure. Les caroténoïdes sont des composés d'intérêt, car ils sont utilisés dans l'industrie alimentaire (coloration), cosmétique et pharmaceutique [73]. De plus, le marc de café est très riche en nutriments utiles à la croissance des champignons : Le phosphore, l'azote et la cellulose sont associés à un pH acide, idéal pour la croissance de différents types de champignons. Il peut être utilisé pour cultiver des champignons sans aucun traitement préalable [74].

De nombreux composants du marc de café sont utilisés dans l'industrie alimentaire. En fait, le marc de café peut être utilisé pour fabriquer des spiritueux aromatisés au café [75]. En matière d'alimentation animale, le marc de café peut être incorporé dans l'alimentation des ruminants, porcs, poulets et lapins. Cependant, la forte teneur en lignine du marc de café limite cette option [76]. La morphologie du marc de café peut également servir à l'industrie de l'alimentation. En effet, les grains de marc de café peuvent servir de support enzymatique pour des processus d'enrichissement en isoflavones dans le lait de soya [7]. Avec un bon ratio C/N, le marc de café peut être utilisé comme fertilisant (Figure II.9). Ainsi, trois méthodes de compostage avec du marc de café ont été comparées, soit le vermis compostage, 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. En ce qui concerne le vermis compostage, il est fortement suggéré d'agir en compostage en mélangeant le marc de café avec d'autres matières organiques pour augmenter la quantité de nutriments [77].



Fig. II.9 : L'utilisation du marc de café comme fertilisant

Références bibliographiques

- [1]. Haddoudi, M., Mellouk, H., Bejjany, B., Dani, A., Digua, K. 2014. Valorisation du marc du café : extraction de l'huile et évaluation de son activité antioxydante. *Les technologies de laboratoire*, vol. 8, 136, 30.
- [2]. Cruz, R., Cardoso, M. M., Fernandes, L., Oliveira, M., Mendes, E., Baptista, P., ...Casal, S. 2012. Espresso coffee residues: a valuable source of unextracted compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(32), 7777-7784.
- [3]. Kovalcik, S., Obruca, I., Marova, A. 2018. Valorization of Spent Coffee Grounds. *Food and Bioproducts Processing*, vol. 110, 104.
- [4]. Gómez-de la Cruz, F. J., Cruz-Peragón, F., Casanova-Pelaez, P. J., 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.
- [5]. Carassou, F. 2015. Une récupération spécifique du marc de café aurait-elle une plus-value pour la communauté, Montréal: Université de Sherbrooke, 11.
- [6]. Shen, K., Gondal, M. A. 2017. Removal of hazardous Rhodamine dye from water by adsorption onto exhausted coffee ground. *Journal of Saudi Chemical Society*, 21, S120-S127.
- [7]. Chen, K. I., Lo, Y. C., Liu, C. W., Yu, R. C., Chou, C. C., Cheng, K. C. 2013. Enrichment of two isoflavoneaglycones in black soymilk by using spent coffee grounds as an immobiliser for β -glucosidase. *Food chemistry*, 139(1-4), 79-85.
- [8]. Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., Mussatto, S. I. 2014. Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and bioprocess technology*, 7(12), 3493-3503.
- [9]. Silva, M. A., Nebra, S. A., Silva, M. M., Sanchez, C. G. 1998. The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. *Biomass and Bioenergy*, 14(5-6), 457-467.
- [10]. Vandeponsele, A., Draye, M., Piot C., Chatel, G. 2020. *Green Chemistry*, 22, 8544-8571.
- [11]. Atabani, A., Mercimek, S., Arvindnarayan, S., Shobana, S., Kumar, G., Cadir, M., Al-Muhatseb, A. H. 2018. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68, 196-214.
- [12]. Ballesteros, L. F., Cerqueira, M. A., Teixeira, J. A., Mussatto, S. I. 2015. *Carbohydrate polymers*, 127, 347-354.
- [13]. Kovalcik, A., Obruca, S., Marova, I. 2018. *Food and Bioproducts Processing*, 110, 104-119.

- [14]. Mussatto, S. I., Carneiro, L. M., Silva, J. P., Roberto, I. C., Teixeira, J. A. 2011. *Carbohydrate polymers*, 83, 368-374.
- [15]. Vardon, D. R., Moser, B. R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R. L., Strathmann, T. J., Rajagopalan, K., Sharma, B. K. 2013. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1, 1286-1294.
- [16]. Lange, J. 2007. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, 1, 9-48.
- [17]. Chatel, G., De Oliveira Vigier K., Jérôme, F. 2014. *Chem Sus Chem*, 7, 2774-2787.
- [18]. Campos-Vega, R., Loarca-Pina, G., Vergara-Castaneda, H. A., Oomah, B. D. 2015. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24-36.
- [19]. El Gharris, H. 2009. *International journal of food science & technology*, 44, 2512-2518.
- [20]. Rasouli, H., Farzaei M. H., Khodarahmi, R. 2017. *International Journal of Food Properties*, 20, 1700-1741.
- [21]. Tsao, R. 2010. *Nutrients*, 2, 1231-1246.
- [22]. Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins S., Teixeira, J. A. 2011. *Separation and Purification Technology*, 83, 173-179.
- [23]. Vandeponsele, A., Draye M., Chatel, G. 2020. *L'Actualité Chimique*, 29.
- [24]. Azouaou, N., Sadaoui, Z., Djaafré A., Mokaddem, H. 2010. *Journal of hazardous materials*, 184, 126-134.
- [25]. Lavecchia, R., Medici, F., Patterer S., Zuorro, A. 2016. *Chemical Engineering Transactions*, 47, 295-300.
- [26]. Loulidi, I., Boukhlifi, F., Ouchabi, M., Amar, A., Jabri, M., Kali, A., Hadey, C. 2021. *International Journal of Chemical Engineering*, 1-11.
- [27]. Yen, P.-L., Hsu, C.-H., Huang, M.-L., Liao, V. H.-C. 2022. *Chemosphere*, 286, 131863.
- [28]. Bok, J. P., Choi, H. S., Choi, Y. S., Park, H. C., Kim, S. J. 2012. *Energy*, 47, 17-24.
- [29]. Stylianou, M., Christou, A., Dalias, P., Polycarpou, P., Michael, C., Agapiou, A., Papanastasiou, P., Fatta-Kassinos, D. 2020. *Journal of the energy institute*, 93, 2063-2073.
- [30]. Juarez, G. F. Y., Pabiloña, K. B. C., Manlangit, K. B. L., Go, A. W. 2018. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 235-246.
- [31]. Nguyen, Q. A., Cho, E. J., Lee, D.-S., Bae, H.-J. 2019. *Bioresource technology*, 272, 209-216.

- [32]. Wang, H.-M. D., Cheng, Y.-S., Huang, C.-H., Huang, C.-W. 2016. *Applied biochemistry and biotechnology*, 180, 753-765.
- [33]. Hudeckova, H., Neureiter, M., Obruca, S., Frühauf, S., Marova, I. 2018. *Letters in applied microbiology*, 66, 306-312.
- [34]. Kwon, E. E., Yi, H., Jeon, Y. J. 2013. *Bioresource technology*, 136, 475-480.
- [35]. Lee, K. H., Jang, Y. W., Lee, J., Kim, S., Park, C., Yoo, H. Y. 2021. *Processes*, 9, 494.
- [36]. Obruca, S., Benesova, P., Kucera, D., Petrik, S., Marova, I. 2015. *New biotechnology*, 32, 569-574.
- [37]. Obruca, S., Benesova, P., Petrik, S., Oborna, J., Prikryl, R., Marova, I. 2014. *Process biochemistry*, 49, 1409-1414.
- [38]. Vardon, D. R., Moser, B. R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R. L., Strathmann, T. J., ... Sharma, B. K. 2013. Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(10), 1286-1294.
- [39]. Battista, F., Zuliani, L., Rizzioli, F., Fusco, S., Bolzonella, D. 2021. *Bioresource Technology*, 342, 125952.
- [40]. Kanlayavattanakul, M., Lourith, N., Chaikul, P. 2021. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 1-12.
- [41]. Suwal, S., Marciniak, A. 2018. *Nepal Journal of Biotechnology*, 6, 74-91.
- [42]. San Martin, D., Orive, M., Iñarra, B., García, A., Goiri, I., Atxaerandio, R., Urkiza, J., Zufia, J. 2021. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 589-599.
- [43]. Givens, D., Barber, W. 1986. *Agricultural Wastes*, 18, 69-72.
- [44]. Cervera-Mata, A., Navarro-Alarcón, M., Delgado, G., Pastoriza, S., Montilla-Gómez, J., Llopis, J., Sánchez-González, C., Rufián-Henares, J. Á. 2019. *Food chemistry*, 282, 1-8.
- [45]. De Bomfim, A. S. C., De Oliveira, D. M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneeckhaute, C., Dumont, M.-J., Rodrigue, D. 2022. *Waste*, 2022, 1, 2-20.
- [46]. Andrade, K. S., Gonçalvez, R. T., Maraschin, M., Ribeiro-do-Valle, R. M., Martínez, J., Ferreira, S. R. 2012. *Talanta*, 88, 544-552.
- [47]. Fan, L., Pandey, A., Mohan, R., Soccol, C. 2000. *Acta Biotechnologica*, 20, 41-52.
- [48]. Santana-Gálvez, J., Cisneros-Zevallos, L., Jacobo-Velázquez, D. A. 2017. *Molecules*, 22, 358.

- [49]. Bekedam, E. K., Schols, H. A., Van Boekel, M. A., Smit, G. 2008. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 2055-2063.
- [50]. Moreira, A. S., Coimbra, M. A., Nunes, F. M., Passos, C. P., Santos, S. A., Silvestre, A. J., Silva, A. M., Rangel, M., Domingues, M. R. M. 2015. *Food chemistry*, 185, 135-144.
- [51]. Langner, E., Rzeski, W. 2014. *International Journal of Food Properties*, 17, 344-353.
- [52]. Wang, Z., Zhang, Z., Li, S., Zhang, X., Xia, M., Xia, T., Wang, M. 2021. *Food chemistry*, 355, 129444.
- [53]. Waldvogel, S. R. 2003. *Angewandte Chemie International Edition*, 42, 604-605.
- [54]. Saberian, M., Li, J., Donnoli, A., Bonderenko, E., Oliva, P., Gill, B., Lockrey, S., Siddique, R. 2021. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125837.
- [55]. Kua, T.-A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Du, Y.-J., Shen, S.-L. 2016. *Construction and Building Materials*, 115, 565-575.
- [56]. Arulrajah, A., Maghoolpilehrood, F., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S. 2014. *Journal of cleaner production*, 72, 181-186.
- [57]. Ktori, R., Kamaterou, P., Zabaniotou, A. 2018. *Materials Today: Proceedings*, 5, 27582-27588.
- [58]. Li, X., Strezov, V., Kan, T. 2014. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 79-87.
- [59]. Yang, L., Havard, P., Corscadden, K., Xu, C. C., Wang, X. 2017. *Bioresource technology*, 237, 108-121.
- [60]. Burniol-Figols, A., Cenian, K., Skiadas, I. V., Gavala, H. N. 2016. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 54-64.
- [61]. Thoppil, Y., Zein, S. H. 2021. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127113.
- [62]. Vandeponsele, A., Draye, M., Piot, C., Chatel, G. 2021. *Clean Technologies*, 3, 335-350.
- [63]. Rodrigues, R., Oliveira, M. B. P. P., Alves, R. C. 2023. *Cosmetics*, 10, 12.
- [64]. Scully, D. S., Jaiswal, A. K., Abu-Ghannam, N. 2016. *Bioengineering*, 3, 33.
- [65]. Nguyen, T. M. T., Cho, E. J., Song, Y., Oh, C. H., Funada, R., Bae, H.-J. 2019. *Food chemistry*, 299, 125120.
- [66]. Marto, J., Gouveia, L., Chiari, B., Paiva, A., Isaac, V., Pinto, P., Simões, P., Almeida, A., Ribeiro, H. 2016. *Industrial Crops and Products*, 80, 93-100.
- [67]. Ribeiro, H. M., Allegro, M., Marto, J., Pedras, B., Oliveira, N. G., Paiva, A., Barreiros, S., Gonçalves, L. M., Simões, P. 2018. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, 6289-6295.

- [68]. Fanali, C., Della Posta, S., Dugo, L., Gentili, A., Mondello, L., De Gara, L. 2020. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 189, 113421.
- [69]. Salazar-López, N. J., López-Rodríguez, C. V., Hernandez-Montoya, D. A., Campos-Vega, R. 2020. *Food Wastes and By-products: Nutraceutical and Health Potential*, 327-351.
- [70]. Gouthamchandra, K., Sudeep, H., Venkatesh, B., Prasad, K. S. 2017. *Food Science and Human Wellness*, 6, 147-153.
- [71]. Pimpley, V. A., Murthy, P. S. 2021. *Food Bioscience*, 43, 101284.
- [72]. Chaves-Ulate, E., Esquivel-Rodríguez, P. 2019. *Agronomía Mesoamericana*, 30, 299-311.
- [73]. Petrik, S., Obruča, S., Benešová, P., Márová, I. 2014. Bioconversion of spent coffee grounds into carotenoids and other valuable metabolites by selected red yeast strains. *Biochemical engineering journal*, 90, 307-315.
- [74]. Murthy P. S., Naidu, M. M. 2012 «Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 66, 45.
- [75]. Sampaio, A., Dragone, G., Vilanova, M., Oliveira, J. M., Teixeira, J. A., 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(2), 557-563.
- [76]. Mussatto, S. I., Carneiro, L. M., Silva, J. P., Roberto, I. C., Teixeira, J. A. 2011. A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate polymers*, 83(2), 368-374.
- [77]. Adi, A. J., Noor, Z. M. 2009. Waste recycling: Utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresource Technology*, 100(2), 1027-1030.

PARTE PRATIQUE

Chapitre III :

Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Dans le cadre de valorisation des quantités rejetées du marc de café par les cafeterias, les foyers, hôtels...etc. Une enquête sur terrain est effectuée dans quelques lieux suspectés d'être sources de marc de café dans la wilaya de Saida afin d'avoir une idée sur les quantités générées et la possibilité de leur valorisation en économie circulaire. Dans l'optique de valorisation, on a essayé de produire un engrais (fertilisant) et un charbon comme source de combustible sous les conditions du laboratoire.

III.2. Situation géographique

La wilaya de Saida est située à 460 Km au Ouest de la capitale Alger et s'étend sur une surface de 75,62 Km² avec une population d'environ 140 289 habitants en 2020, soit une densité de 1850 habitant /Km². Elle est composée de 6 daïras soit 16 communes (Figure III.10).



Fig. III.10 : Carte géographique de Saida [1]

Les wilayas limitrophes de la wilaya Saida (Figure III.11) sont :

- Mascara au Nord,
- Sidi Bel Abbès à l'Ouest,
- Tiaret à l'Est,
- El Bayadh au Sud.



Fig. III.11 : Limites géographiques de Saida [2].

III.3. Le climat

La wilaya de Saida présente un climat méditerranéen semi-aride et un écart de température de 30°C entre les températures du mois de janvier et celle d'août. L'été s'étend sur 5 à 6 mois environ avec des masses d'air chaud à partir du mois de mai. La pluviométrie reste variable et atteint 300 à 350 mm/an [3].

III.4. Collecte et préparation du marc de café (MC)

Le marc de café (Figure III.12) utilisé dans notre étude a été collecté d'une manière arbitraire à partir de différents lieux (Caféterias) dans la wilaya de Saida. MC a été séché dans une étuve à une température de 80°C pendant 24 heures. Une fois séché, le MC est placé dans un récipient opaque et stocké dans l'obscurité à température ambiante.



Fig. III.12 : Image de Marc de café

III.5. Analyses physico-chimiques du marc de café

III.5.1. Détermination de la teneur en eau (humidité)

- **Principe**

Elle est déterminée par séchage dans une étuve jusqu'à ce que le poids devienne constant. La différence de poids correspond à la perte d'humidité et le résidu caractérise la teneur en matière sèche de l'échantillon.

➤ **Mode opératoire**

Plusieurs creusets en porcelaine préalablement tarés (nombre de 3 répétitions), contenant 400g du marc de café humide, sont par la suite placés dans une étuve maintenue à 80°C pendant 48 heures. Les creusets sont mis dans un dessiccateur pendant au moins une heure pour refroidir dans une atmosphère sèche. La matière sèche (MS) est calculée selon l'expression suivante :

$$\mathbf{MS \ (\%) = \frac{P2-Tc}{P1-Tc} \times 100} \dots\dots\dots \text{(III.1)}$$

Où :

P1 : Poids de creuset avant séchage (g);

P2 : Poids de creuset après dessiccation (g);

Tc : Poids de creuset vide taré (g).

Le taux d'humidité est calculé à partir de la formule suivante :

$$\mathbf{\% \ d'humidité = 100 - \% \ MS} \dots\dots\dots \text{(III.2)}$$

III.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)

➤ **Principe**

Lorsque l'échantillon, préalablement séché, est soumis à une carbonisation à haute température, la matière organique se transforme en charbon.

➤ **Mode opératoire**

400g de marc du café (matière sèche) déjà obtenue est pesés dans un creuset en porcelaine préalablement taré, ils sont placés dans un four à moufle (EUROTHERM) et porté à une température de 450°C et P= 1 atm durant 30 minutes (nombre de 3 répétitions). La substance prend une couleur noir grisâtre en refroidissant pendant au moins 24 heures dans le four à moufle. Le résidu obtenu représente les biocharbon qui, par différence, donne la matière organique contenue dans l'échantillon. Le pourcentage des cendres ou la matière minérale (MM) est calculé par l'expression suivante :

$$\mathbf{MM \ (\%) = \frac{P3-Tc}{P1-Tc} \times 100} \dots\dots\dots \text{(III.3)}$$

Où :

P3 : Poids de creuset après incinération (g);

P2 : Poids de creuset après dessiccation (g);

Tc : Poids de creuset vide (g).

La teneur en matière organique (MO) est calculé à partir de la formule suivante :

$$\% \text{ MO} = 100 - \% \text{ MM} \dots \dots \dots \text{(III.4)}$$

III.5.3. Détermination du pH

Le potentiel d'hydrogène (pH) des échantillons est déterminé via des solutions du marc de café après filtration. Le pH est mesuré en utilisant un pH mètre muti-paramètres (Mettler-Toledo AG, Schwerzenbach, Switzerland). Les essais sont répétés 3 fois.

III.5.4. Analyse par Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

L'analyse IRTF (Infra Rouge à Transformée de Fourier) est une technique très utilisée à l'étude des fonctions des solides car elle permet une analyse qualitative des principaux groupes fonctionnels. L'analyse infrarouge a été effectuée via un spectromètre à transformée de Fourier de marque Shimadzu, type FTIR 8300 dont la gamme de fréquences est comprise entre 400 et 4000 cm⁻¹ (64 scans) en utilisant la méthode de pastille en KBr.

III.5.5. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse minéralogique de notre matériau, réalisée par diffraction des rayons X (DRX), permet d'identifier les espèces minérales qui la constituent. Le principe de cette méthode est d'observer la diffraction par un réseau cristallin d'une onde électromagnétique incidente de longueur d'onde λ . Les rayons réfléchis sont reçus par un détecteur transmettant les impulsions à un potentiomètre qui enregistre les angles et trace un pic lorsqu'il y a réflexion suivant la loi de Bragg [4] par la formule suivante :

$$2d \sin \theta = n \lambda \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

Avec :

λ : longueur d'onde du faisceau des rayons X ;

d : distance réticulaire ;

θ : angle de Bragg ;

n : ordre de réflexion.

III.6. Conversion du marc de café en charbon

➤ **Objectif**

Ce protocole vise à convertir le marc de café en charbon par carbonisation à différentes températures et durées, en utilisant un four de laboratoire à fin de déterminer et identifier les conditions optimales de production du charbon.

➤ **Mode opératoire**

A fin d'optimiser le meilleur rendement en masse, 400g de marc du café (matière sèche) déjà obtenue est pesée dans un creuset en porcelaine préalablement taré, ils sont placés dans un four à moufle (EUROTHERM) et porté à différents température; 380, 400, 450 et 500°C au cours de différents laps de temps 15, 20 et 30 minutes. Les essais sont répétés 3 fois. Le creuset est refroidit pendant au moins 24 heures dans le four à moufle. Le résidu obtenu représente les cendres. Le rendement en masse est calculé par l'expression suivante :

$$R (\%) = (P_c / P_i) \times 100 \dots \dots \dots \text{ (III.6)}$$

Où :

R : Rendement

P_c : Poids de charbon (g);

P_i : Poids initiale du marc de café (g).

III.7. Valorisation du marc de café comme engrais

III.7.1. Situation géographique

L'essai est réalisé au laboratoire de l'université Dr. TAHAR MOULAY (Faculté des sciences de la nature et de la vie).

III.7.2. Matériel végétal

Durant l'essai, une variété de *Laitue* (Figure III.13), est mise en culture dans des pôts. Les plantes de la variété *Laitue* ont été cultivés au laboratoire de la faculté des sciences de la nature et de la vie.



Fig. III.13 : Image de semance de la variété *Laitue*

III.7.3. Préparation des plants

Après avoir acheté des semences de la variété *Laitue*, le semis a été effectué le 14 mai 2025, dans 12 pôts. Le test est réparti en 4 expériences (voir tableau 5) avec 3 répétitions chaque une (Figure III.14).

Tableau 5 : Plan de test de valorisation du marc de café comme engrais.

Pot N°	Substrat (composition du sol)	Engrais ajouté	Moment d'application
1	Terre rouge agricole	Oui	Incorporé dans le sol, avant la germination
2	Terre rouge agricole	Oui	Déposé en surface, après la germination
3	Mélange terre de labo (terreau) et terre rouge agricole	Oui	Incorporé dans le sol, avant la germination
4	Terre rouge agricole	Non	—



Fig. III.14 : Dispositif expérimental de l'essai.

Chaque pôt est remplis de 3 cm de gravier au fond avec different type du substrats tout on ajoutons ou non l'engrais (Figure III.15). Des graines de semences de *Laitue* ont été déposées au centre de chaque pôt, remplie de substrat. Des irrigations fréquentes sont réalisées tous les 1 à 2 jours à l'aide d'un vaporisateur pour maintenir une humidité adéquate du substrat.

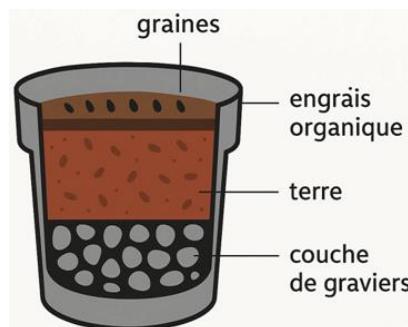


Fig. III.15 : Schéma d'expérience

III.7.4. Fertilisation organique des plantes

Au cours de l'essai on a utilisé comme fertilisant organique le marc de café. Ce dernier provient d'une collecte faite quotidiennement dans les cafétériats de wilaya de Saida puis séché à l'aire libre à une durée d'un mois pour éviter la formation des moisissures.

La cause de notre choix est que le marc de café convient aux plantes, il est efficace pour fertiliser le sol, il est un excellent engrais naturel et peut également être utilisé comme terreau pour les semis, il a une teneur élevée en phosphore, azote et potassium. Ainsi, c'est un bon allié pour les plantes. Il améliore la floraison des plantes, fournit les éléments nutritifs et la qualité du sol.

III.7.5. Paramètres morphologiques

L'effet de valorisation du marc de café comme engrais sur la culture de la variété *Laitue* a été démontré par l'évaluation des paramètres suivants :

III.7.5.1. Cinétique de longueur

La hauteur la variété *Laitue* a été effectuée, par mesure de la longueur de tige de l'espèce en centimètre (cm), et à chaque 05 jour depuis le premier jour, jusqu'à ce que la plante cesse de pousser.

III.7.6. Ajustement de pH du marc de café utilisé comme engrais

Une mesure de pH du marc de café (MC), nous a permis de conclure qu'il est légèrement acide et le pH de charbon qui est basique. Sachant que chaque culture végétale est conditionnée par un pH bien déterminé allant d'un pH acide jusqu'à un pH basique, nous avons essayé de varier le pH du MC selon les besoins des cultures végétales tout en utilisant un mélange bio composé du marc de café et charbon issu de carbonisation du marc de café. Pour se faire, des mélanges ont été réalisés tout en maintenant le poids total constant de 20 g par échantillon (tableau 6).

Tableau 6 : Plan de test d'ajustement de pH du marc de café utilisé comme engrais.

Echantillon N°	Composition	
	<i>Marc de café (g)</i>	<i>Charbon (g)</i>
1	0	20
2	20	0
3	19	1
4	18	2
5	17	3
6	16	4
7	15	5
8	14	6
9	13	7
10	12	8
11	11	9
12	10	10

Chaque mélange a été soumis à la même procédure de mesure du pH afin d'observer l'évolution de pH en fonction de la quantité du marc de café substitué par de biocharbon.

III.8. Test de valorisation du charbon comme combustible

➤ Objectif

Ce protocole vise à tester le potential d'utiliser le charbon comme combustible et source d'énergie dans different secteurs.

➤ Mode opératoire

Un montage a été conçu (Figure III.16) à fin de nous permettre de quantifier l'énergie libérée suite à la combustion de 2g d'échantillon (tableau 7) dans un creuset en porcelaine. Les détecteurs placés en entrée, sortie et à l'intérieur de dispositif relié à un microordinateur nous ont permis de quantifier la température d'une façon numérique.



Fig. III.16 : Quelques photos de dispositif pour la quantification d'énergie libérée

Une fois les températures sont mesurés, ils seront insérés dans une équation (ci-dessous) qui nous permis de calculer l'énergie calorifique suivant l'équation suivante :

$$Q = m \times c \times \Delta T \dots \dots \dots \text{(III.7)}$$

Avec :

Q : Quantité d'énergie thermique (Joule)

m : Masse du corps (kg)

c : Capacité thermique massique spécifique ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

ΔT : Variation de température entre la température initiale et finale du corps ($^\circ\text{C}$)

Tableau 7 : Plan de test de valorisation du charbon comme combustible.

Echantillon N°	Composition
1	Charbon issue du marc de café
2	Charbon issue du bois
3	Sciure issue du bois
4	Mélange (50% : 50%) (Charbon issue du marc de café : Sciure issue du bois)

III.9. Application Intelligence Artificiel (IA)

III.9.1. Plateforme (Plant-Pal)

➤ Projet structure

* /plantpal

```
|   └── * public           ← Image et icône
|   └── * src
|       |   └── * components    ← Composant
|       |   └── * pages        ← Pages
|       |   └── * api          ← API (Rappeler les fichiers)
|       |   └── * utils         ← Outils d'aide
|       └── App.jsx          ← Point d'entrée en application
|   └── .env                ← Stockage des clés secrètes
└── package.json          ← Gestion des colis
```

❖ Clé API

VITE_OPENAI_KEY=sk-xxxxxx

VITE_PLANT_ID_KEY=plantid-xxxxx

VITE_WEATHER_API_KEY=xxx

❖ Rappeler les fichiers API

⊕ ChatGPT API

```
fetch("https://api.openai.com/v1/chat/completions", {
  method: "POST",
  headers: {
    "Content-Type": "application/json",
    Authorization: `Bearer ${import.meta.env.VITE_OPENAI_KEY}`,
  },
  body: JSON.stringify({
    model: "gpt-4",
    messages: [{ role: "user", content: "فيرا؟ الالوة بنبيه أعتني كيف" }],
  }),
})
```

});

Plant.id API

```
fetch ("https://api.plant.id/v2/identify", {  
  method: "POST",  
  headers: {  
    "Content-Type": "application/json",  
    "Api-Key": import.meta.env.VITE_PLANT_ID_KEY,  
  },  
  body: JSON.stringify({  
    images: [imageBase64],  
    organs: ["leaf", "flower"],  
  }),  
});
```

OpenWeather API

```
const url =  
`https://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?lat=${lat}&lon=${lon}&units=metric&appid=${import.meta.env.VITE_WEATHER_API_KEY}`;  
fetch(url);
```

III.9.2. Cas d'utilisation

- Télécharger la photo d'une plante → Plant.id API
- Question sur l'entretien des plantes → ChatGPT API
- Suiver l'arrosage et la fertilisation → Firebase or Supabase
- Affichage météo → OpenWeather API
- Horaire d'arrosage sugérés en fonction d'emplacement et de météo → OpenWeather + Geolocation
- Vente d'engrais → Marché intérieur de la plateforme

III.9.3. Etapes pour exporter V0.dev

1. A V0, Choisir "Export to Code"
2. Choisir React ou Next.js
3. Télécharger le projet et ouvrir-le dans VSCode
4. Ajouter des fichiers API dans un dossier/src/api

5. Crée un fichier.env et ajouter des clés
6. Le projet a été mené localement par: npm run dev

III.9.4. Sécurité et protection

- Ne mettre pas de clés API directement dans votre code, utiliser des fichiers .env.
- Utiliser import.meta.env pour lire les valeurs dans React/Vite
- Enregistrer les utilisateurs via Firebase Auth ou Clerk
- Définir les différentes autorisations en fonction du type d'utilisateur dans la base de données.

Références bibliographiques

- [1]. Anonyme. Consulté le 15-06-2025. <https://gifex.com/fr/fichier/quelles-sont-les-communes-de-la-wilaya-de-saida/>
- [2]. Abbas, Y., Brahim, A., Oguiba M. 2020. Approche Hydrogéologique Hydrochimique des eaux souterraines dans une zone semi aride: Cas de la nappe de SAIDA. Mémoire de master. Université Ibn Khaldoun, Tiaret.
- [3]. Anonyme. Consulté le 15-06-2025.
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Sa%C3%AFda_\(Alg%C3%A9rie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sa%C3%AFda_(Alg%C3%A9rie))
- [4]. Jouenne, C. A. 1990. Traité de céramiques et matériaux minéraux. Ed Septima. Paris.
- [5]. Valérie, T-M. 2014. Spectrométrie de fluorescence X. Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes, Editions des archives contemporaines, *Collection Sciences Archéologiques*.

Chapitre V :
Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer et discuter l'essentiel des résultats expérimentaux obtenues suite aux Enquêtes sur terrain puis séchage, caractérisations et valorisation du marc de café.

IV.2. Enquête sur terrain

Le Tableau 8 représente des statistiques sur les quantités de marc de café rejetées suite à une enquête menée de 13/02/2025 au 06/03/2025 dans quelques lieux de la ville de Saida, plus précisément; (Commune Aïn Hadjar, Quartier Mizane, Quartier Darbe, Quartier la Marine, Quartier Ennasser, Quartier 5 Juillet, Quartier Riad, Quartier Dar El-Beida, Quartier Salam 2, Quartier El Aakid et au Commune Ouled Khaled).

Les quantités de marc de café générés provenant des cafétérias sont estimés à 673 kg/jour soit 14 806 kg/mois (Calculé au bout de 22 jours ouvrables) et 177 672 kg/an. En prenant en compte la dimension de la wilaya, les quantités générées peuvent être considérable. Les moyennes des quantités générées par cafétéria quotidiennement diffèrent d'un lieu à l'autre, elles sont comprises entre 6.20 et 11 kg/Caf/ jour. Cependant, il est signalé que la Cafétéria d'El Akid génère la quantité la plus élevée. Cela peut être expliqué par la densité de population dans ce lieu, le nombre des Cafétérias ou même par la localisation de Cafétéria au niveau de la ville de Saida.

D'après le tableau 8, nous avons constatés que le marc café est jeté directement dans les points de pré collecte pour finir dans les centres d'enfouissement technique (C.E.T) et les décharge. Ce déchet est un produit contenant beaucoup de composés, tels que la caféine, des tanins et des polyphénols [1]. Ces composés à caractère écotoxique ne doivent pas se retrouver dans la nature, particulièrement dans les cours d'eau. Ils provoquent des conséquences néfastes sur l'environnement y compris la qualité des eaux. Il faut noter que le marc de café exige une forte demande en oxygène [2]. Pour diminuer l'impact de ce déchet sur les décharges et C.E.T, il est recommandé de le récupérer et le valoriser comme matière secondaire pour différentes utilisations.

Tableau 8 : Quantité de marc de café générée par quelques lieux dans la wilaya de Saida.

Lieu d'enquête	Nombre des cafétérias	Quantité total générée (kg)			Moyenne quantité générée kg /cafétéria /jour
		Quotidienne	Mensuelle	Annuelle	
Commune Aïn Hadjra	17	163	3 586	43 032	9.59
Commune Ouled Khaled	13	115	2 530	30 360	8.85
Commune Saida :					
Quartier Mizane	8	86	1 892	22 704	10.75
Quartier Darbe	7	51	1 122	13 464	7.28
Quartier la Marine	4	34	748	8 976	8.50
Quartier Ennasser	5	31	682	8 184	6.20
Quartier 5 Juillet	3	24	528	6 336	8.00
Quartier Riad	8	73	1 606	19 272	9.12
Quartier Dar El Beida	4	26	572	6 864	6.50
Quartier Salam 2	6	59	1 298	15 576	9.83
Quartier El Akid	1	11	242	2 904	11
Total	76	673	14 806	177 672	-

IV.3. Analyses physico-chimiques du marc de café

Au cours de l'essai on a opté à des analyses physico-chimiques sur le marc de café. Les résultats obtenus sont illustrées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Résultats des analyses physico-chimiques de marc café.

Analyse	Unité	Valeur
Matière Sèche (MS)	%	86.75 ± 3.12
Humidité (H)	%	13.25 ± 0.97
Matière Minérale (MM)	%	25.23 ± 1.08
Matière Organique (MO)	%	74.77 ± 5.46
pH	-	5.7 ± 0.39

Le marc de café étudié renferme un taux d'humidité estimé à 13,25% et en parallèle un taux élevé en matière sèche qui dépasse les 86%. Nos résultat sont cohérents avec celle de Cruz et *al.*, [3] ayant trouvé un taux d'humidité du MC variant entre 13 à 45%. Il a été rapporté que plusieurs paramètres ont un effet significatif sur le taux finale d'humidité du marc de café tel que; la variété du café, l'origine, les conditions de torréfaction et les différentes techniques de préparation de boisson (décoction, infusion ou pressage) de café.

Par la quantification des taux de la fraction minéral, on a réussi à avoir un taux de 25.23% de la matière sèche (MS) du marc de café contre un taux enregistré en matière organique qui avoisine les 74.77%. Le résultat obtenu dans cette étude est en accord avec celui de Peshev *et al.*, [4] rapportant une quantité des minéraux dans le marc du café qui dépasse les 4.5% de MS. Plusieurs recherches en composition ont réussi à identifier et quantifiés, à savoir le phosphore, le potassium, le magnésium, le calcium, le manganèse, le cuivre, le sodium, le fer et le zinc. Le potassium est considéré comme le minéral le plus abondant dans le marc [1, 4, 5]. Ces minéraux sont considérés comme des micronutriments essentiels pour la santé humaine. Ils régulent de multiples fonctions métaboliques et physiologiques du corps humain, de plus, ils pourraient être utilisés pour la production d'aliments nutritifs ajoutés [6].

Nos échantillons du marc de café ont enregistrés un pH légèrement acide (5.7). Cette légère acidité pourrait être due à la présence d'un pourcentage bien défini du café *Arabica* renommé par son acidité élevée comparativement au café *Robusta*. Todaka *et al.* [7] ont rapporté une fourchette de pH du marc de café allant de 4.2 jusqu'à 5.7, ce qui est en accord avec nos résultats.

IV.4. Analyse par Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

L'analyse par spectroscopie-infrarouge via un spectromètre à transformée de Fourier de marque Shimadzu, type (FTIR -8300) pour les bandes d'adsorption entre 4000-400 cm^{-1} (Figure IV.17), ont été réalisés sur une pastille du marc de café brute séché dans le KBr. Les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous.

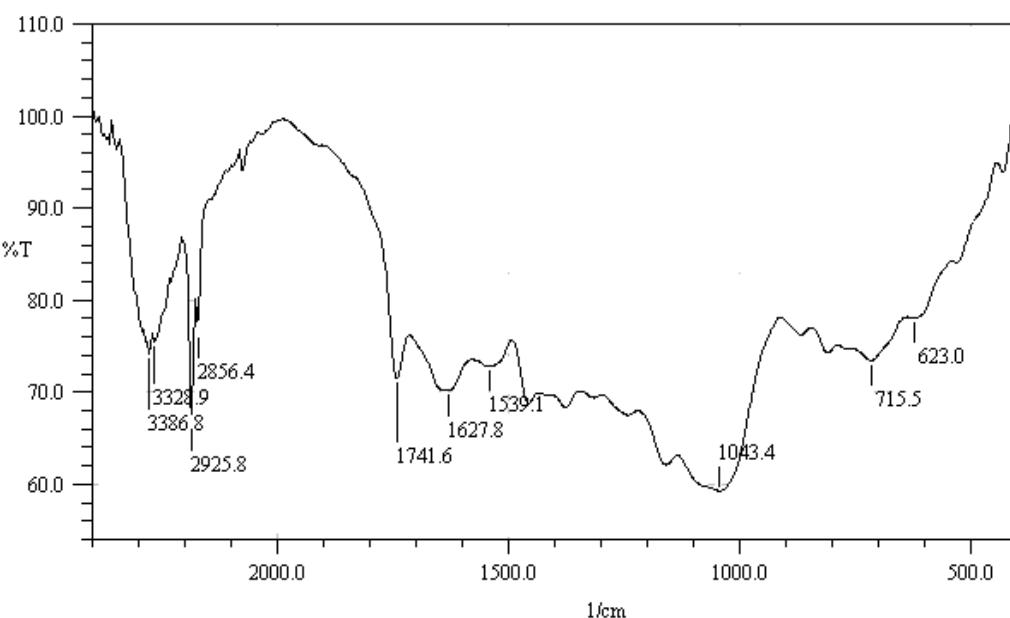


Fig. IV.17 : Spectre FTIR du Marc de café brut séché

Le spectre FTIR du marc de café présenté sur la figure IV.17 montre une bande centrée à 3386.8 cm^{-1} ce qui pourrait être attribué aux groupes d'hydroxyle collés (OH) sur la surface du marc de café brut. La bande dans la gamme de 2925.8 cm^{-1} peut être due à la présence de l'étirage de C-H du groupe d'alcanes (groupe méthyle de la molécule de caféine), ainsi que des sucres dans le marc de café. Les pics à 1741.6 et 1627.8 cm^{-1} peuvent être assignés à l'étirage de C=O de groupe carboxylique tel que (les esters aliphatiques ou les triglycérides d'origine lipidique) [8]. Les bandes observées à 1043.4 cm^{-1} correspondent à un groupement aromatique à l'étirage de –CH, qui peuvent être attribuées à la liaison β de cellulose. Les bandes observées à environ 715.5 – 623.0 cm^{-1} sont assignées à l'étirage de -CN. A partir de

ces résultats, on pourra confirmer que le marc de café possède plusieurs groupements actifs [9]. De plus, d'après les études de Chun et al. [10], les résultats FTIR ont montré l'existence d'un matériau lignocellulosique typique, composé de polysaccharides et de polymères aromatiques.

IV.5. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Les spectres d'analyse par diffractions des rayons X sur deux échantillons; dont la première est de marc de café brute séché et la seconde est le marc de café après carbonisation à une température de 450°C dans un four à moufle sont représentés dans la figure IV.18 et tableau 10.

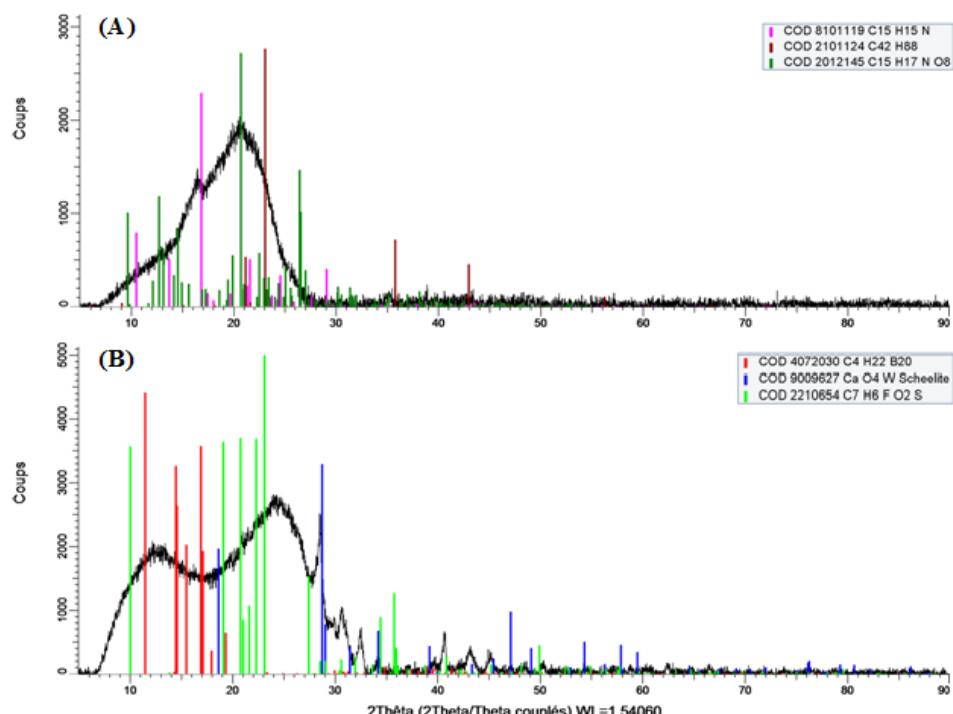


Fig. IV.18 : Diagramme de diffraction de rayon X de
(A): marc de café brute séché, (B): marc de café après carbonisation à 450 °C

Tableau 10 : Analyses de résultat de diagramme DRX de marc café brute séché et marc café après carbonisation à 450 °C

	Marc café brute séché			Marc café après carbonisation à 450 °C		
Formule	C ₁₅ H ₁₇ N O ₈	C ₁₅ H ₁₅ N	C ₄₂ H ₈₈	C ₇ H ₆ F O ₂ S	C ₄ H ₂₂ B ₂₀	Ca O ₄ W
Concentration	65,1	22,2	12,7	49,1	48,1	2,8
Système	Monoclinique	Monoclinique	Orthorhombic	Orthogonal	Monoclinique	Tetragonal
Couleur	Vert	Rouge	Maron	Vert	Rouge	Bleue

La composition de phase minérale des deux échantillons a été identifiées par la méthode de diffraction des rayons X (DRX). La figure IV.18 présente les résultats de DRX des deux échantillons. Les pics à 20,2 (Fig. IV.18. B) contre 12,5 et 24 (Fig. IV.18. A) ont été attribués au type cristallin natif de cellulose ou d'hémicelluloses et à leurs composés correspondants [11, 12]. De façon plus détaillé, de la figure IV.18 ont peut dire que :

- Pour le marc de café brut séché (Fig. IV.18. A)
 - ❖ Phases dominantes :
 - ⊕ C₁₅ H₁₇ N O₈ (**65.1 %**): Correspond probablement à l'acide chlorogénique (antioxydant clé du café).
 - ⊕ C₁₅ H₁₅ N (**22.2 %**): Probablement la trigonelline (un alcaloïde du café).
 - ⊕ C₄₂ H₈₈ (**12.7 %**): Un hydrocarbure à longue chaîne (ex.: cire végétale ou un contaminant).
 - ❖ Observations clés :
 - ⊕ Biomarqueurs naturels: L'acide chlorogénique et la trigonelline sont attendus dans le café brut.
 - ⊕ Contaminant potentiel: Le C₄₂ H₈₈ pourrait provenir des lipides ou d'un contact avec des équipements de traitement.
 - ⊕ Systèmes cristallins: Monoclinique pour (C₁₅ H₁₇ N O₈, C₁₅ H₁₅ N) et orthorhombique pour (C₄₂ H₈₈)
- Pour le marc de café carbonisé à 450 °C (Fig. IV.18. B)
 - ❖ Phases dominantes :
 - ⊕ C₇ H₆ F O₂ S (**49.1 %**): Probablement un composé organosoufré/fluoré (ex.: sulfonate aromatique).
 - ⊕ C₄ H₂₂ B₂₀ (**48.1 %**): Un complexe boré-hydraté (possible un carborane).
 - ⊕ Ca O₄ W (**2.8 %**): Scheelite, un minéral contenant du tungstène.
 - ❖ Observations clés :
 - ⊕ Présence organique persistante: Une carbonisation à 450 °C fait apparaître des phases organiques dominent (97,2 % au total). Cela suggère une carbonisation en composés stables.
 - ⊕ Trace minérale: La scheelite (Ca O₄ W) est probablement une impureté (par ex. provenant du sol ou des engrains). Sa faible concentration (2.8 %) indique que le café lui-même ne contient pas de tungstène.

- **Systèmes cristallins:** Orthorhombique pour ($C_7 H_6 F O_2 S$), monoclinique pour ($C_4 H_{22} B_{20}$) et tétragonal ($Ca O_4 W$).

Suite à cela, on peut dire que l'opération de carbonisation à 450 °C a fait apparaître des composés organiques thermorésistants stables (ex.: biochar) à (97.2 %) + des traces d'impureté minérale. La présence de complexe boré-hydraté ($C_4 H_{22} B_{20}$) pourrait être expliquer par une absorption via le sol ou des résidus d'engrais. Cependant le marc de café brute sèche est riche en biomolécules spécifiques au café (acide chlorogénique, trigonelline) avec des contaminants mineurs.

IV.6. Conversion du marc de café en charbon

A fin de déterminer les conditions opératoires optimales (température et temps) pour avoir un meilleur rendement en masse de biocharbon, des échantillons du marc de café déjà séché sont placés dans un four à moufle et porté à différents température; 380, 400, 450 et 500°C au cours de différents laps de temps 15, 20 et 30 minutes (Voir annexe, tableau 1). La figure IV.19 résume les différents résultats obtenus.

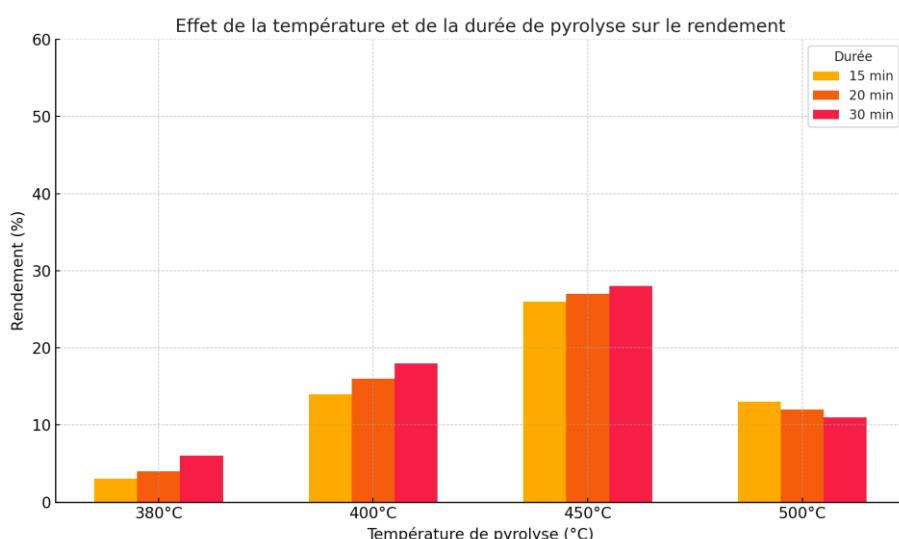


Fig. IV.19 : Résultats de la conversion du marc de café en charbon

A partir de figure IV.19, il est très clair que le meilleur rendement en charbon (25.23 %) (m/m) est obtenu au bout de 30 minutes et à température de 450 °C et le plus faible rendement (2.50 %) (m/m) est obtenu au bout de 15 minutes et à température de 380 °C. Cependant, il est à signaler que les plus faibles rendements sont enregistrés après 15 minutes de pyrolyse contre les meilleurs rendements aboutis au bout de 30 minutes de pyrolyse. Cela signifie que le temps a un effet significatif sur le taux de rendement en masse.

Il est reconnu que la carbonisation est définie comme étant le processus par lequel des résidus solides à haute teneur en carbone sont formés à partir de matières organiques, généralement par pyrolyse dans une atmosphère inerte [13]. Au cours de ce processus de décomposition thermique, l'humidité et les composés volatils sont éliminés, laissant un résidu solide (charbon), des liquides (vapeurs condensables) et des gaz permanents. La pyrolyse lente est un procédé privilégié pour la carbonisation, car elle maximise le rendement en charbon et se caractérise par des vitesses de chauffe lentes (généralement 5 à 80 °C/min), des temps de séjour longs des solides et des gaz, et des températures relativement basses (généralement de 400 à 600 °C) en absence d'oxygène [14, 15]. De nombreux chercheurs ont étudié l'influence des conditions opératoires de pyrolyse sur les rendements des produits et il est généralement admis que les paramètres du procédé qui influencent le plus la distribution du produit sont la température de pyrolyse, la vitesse de chauffage, le temps de séjour et la pression du réacteur [16-18].

IV.7. Valorisation du marc de café comme engrais

Une expérience est approuvée afin de déterminer l'effet du marc de café utilisé comme engrais dans des conditions contrôlées sur la cinétique d'hauteur de *Laitue* (prise chaque 5 jours et durant un mois). Les différents résultats enregistrés sont illustrés dans la figure IV.20.

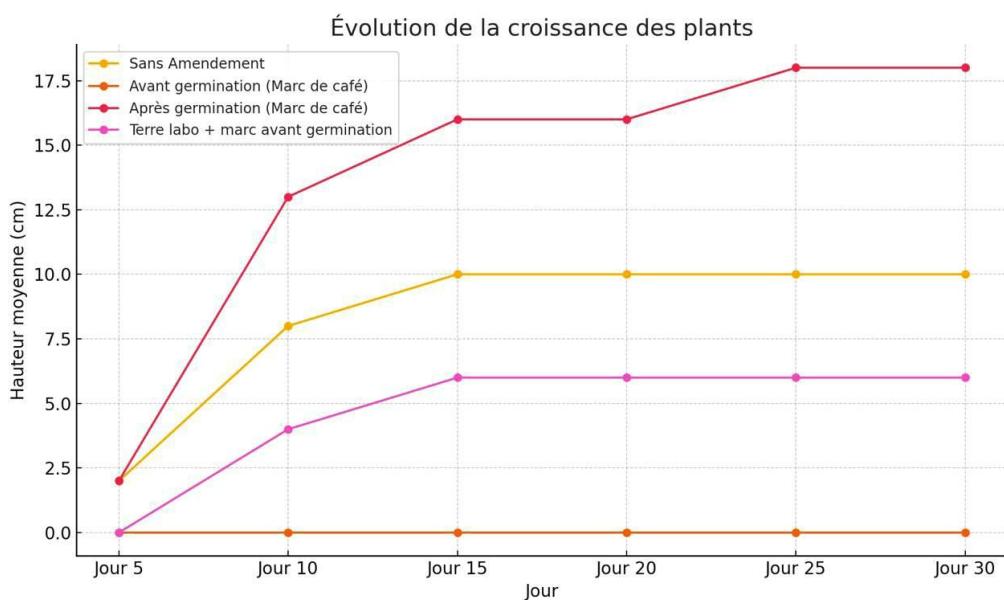


Fig. IV.20 : Résultats d'effet de fertilisation avec marc de café sur l'évolution de la croissance de (*Laitue*) selon les différents traitements.

La Figure IV.21 montre une différence dans l'évolution de la longueur de la tige principale. La plus grande longueur est enregistrée dès le 25^{ème} jour avec le groupe traité avec le marc de

café comme fertilisant organique après germination (25 cm) (Fig. IV.21. A), Dans ce cas, on peut dire que une fois l'apparition des pousses, le marc de café agit comme un engrais organique à libération lente, fournissant progressivement de l'azote, du potassium, etc. Le deuxième groupe utilisé comme témoin (Terre rouge agricole sans Marc de café) a atteint une longueur de (10 cm) (Fig. IV.21. B) enregistré dès le 10^{ème} jour (Voir annexe, tableau 2) cela signifie qu'il existe une croissance stable et naturelle des *laitues* qui ont poussé de manière homogène avec une couleur verte vive. Cela montre que le sol utilisé était suffisamment fertile pour soutenir la croissance sans aucun ajout de fertilisant. Cependant, il est signalé que le groupe qui a utilisé la terre rouge agricole avec addition du Marc de café avant germination n'a pas enregistré aucun évolution (0 cm) (Voir annexe, tableau 2). Donc c'est très clair que le marc de café a agit comme un herbicide ou un inhibiteur de germination à court terme. Il contient des composés phénoliques et de caféine qui peuvent empêcher la germination.

Pour ce qui est de substrat, l'expérience a fait apparaître l'utilisation de deux types de sol dont; les terres rouges agricoles et le sol appelé terreau. La terre rouge est le nom générique d'un type de sol qui se développe généralement sous un climat chaud ou tempéré et humide [19]. Environ 13 % des sols de la Terre sont des sols rouges. Il ne contient que de fines couches organiques et organo-minérales. Ces sols sont riches en argile et leur couleur rouge, brun-rougeâtre à jaune-rougeâtre est due à une forte teneur en fer [20]. C'est un bon ou mauvais substrat de croissance pour des cultures, selon la façon dont il est géré. Souvent acide, pauvre en nutriments et en humus. Sa fertilité peut être optimisée avec un apport en matière organique [19]. Cependant, le terreau est un support de culture naturel formé de terre végétale enrichie de produits de décomposition (fumier et débris de végétaux décomposés) qui apportent la matière organique. Le terreau doit avoir une porosité en air et en eau permettant à la fois l'ancre des organes absorbants des plantes et leur contact avec les solutions nécessaires à leur croissance (engrais) [21].

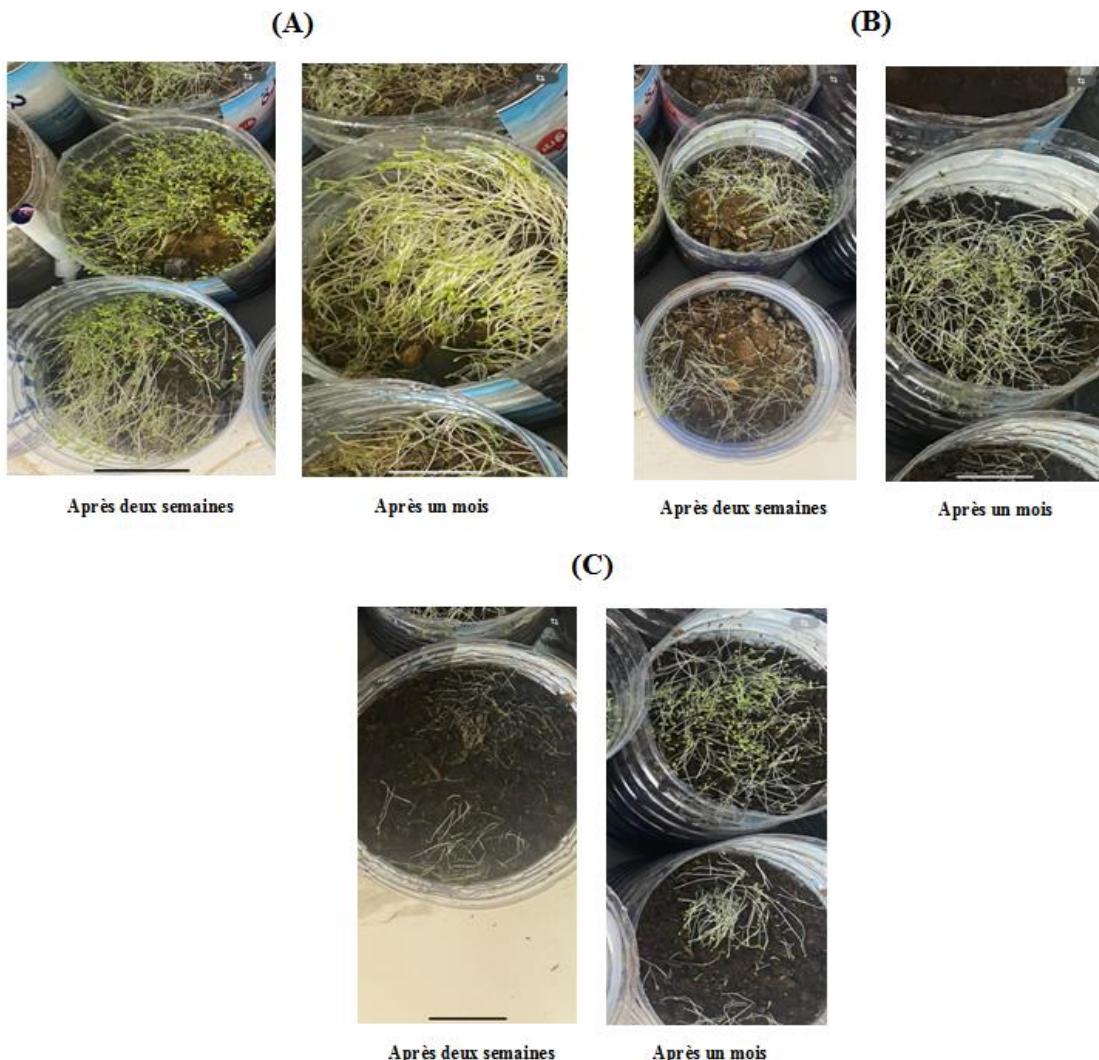


Fig. IV.21 : Photos de différents pots suite aux différents traitements avec marc de café;
 (A): Terre rouge agricole + Marc de café après germination, (B): Terre rouge agricole sans
 Marc de café, (C): Mélange terre de labo (terreau) et terre rouge agricole + Marc de café avant
 germination

A l’égard de la situation actuelle, les effets néfastes des pesticides et des engrains synthétiques à grande échelle sont apparus sur l’environnement et la santé humaine. Pour cette raison, les bioproduits présentent une solution qui permettant de répondre aux contraintes environnementales. Dans ces circonstances, les déchets tel que le marc de café peuvent être recyclé pour produire un biofertilisant, biofortifiant, biopesticide.... qui est stable et efficace, et améliorent la nutrition des plantes. L'avantage du marc de café est très évident sur l'amélioration des paramètres de croissances. En effet, le marc de café a un effet appréciable sur la longueur de la partie souterraine. Des résultats similaires utilisant le marc de café en

tant que substrat ont été signalés sur les céréales, les fruits et les légumineuses [22-25]. Ils ont démontré que le marc de café a un potentiel considérable pour améliorer significativement la croissance des plantes. L'augmentation de la hauteur de la plante résulte de la stimulation des substances auxiliaires produites lors de la consommation de marc de café. Ce constat conduit à l'hypothèse suivante : le marc de café est riche en nutriment qui stimule la multiplication cellulaire. Cette hypothèse est confirmée par plusieurs auteurs qui ont rapportés que l'augmentation significative de la croissance des plantes qui est due à la texture très poreuse d'engrais (marc de café) et qu'est riche en nutriments et minéraux tell que le N.P.K et qui jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés physiochimiques [26-28].

IV.8. Résultats d'ajustement du pH du marc de café utilisé comme engrais

Une étude est lancé pour déterminer l'évolution de pH du mélange composé du marc de café (MC) sèche et de biocharbon (Voir annexe, tableau 3). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure IV.22.

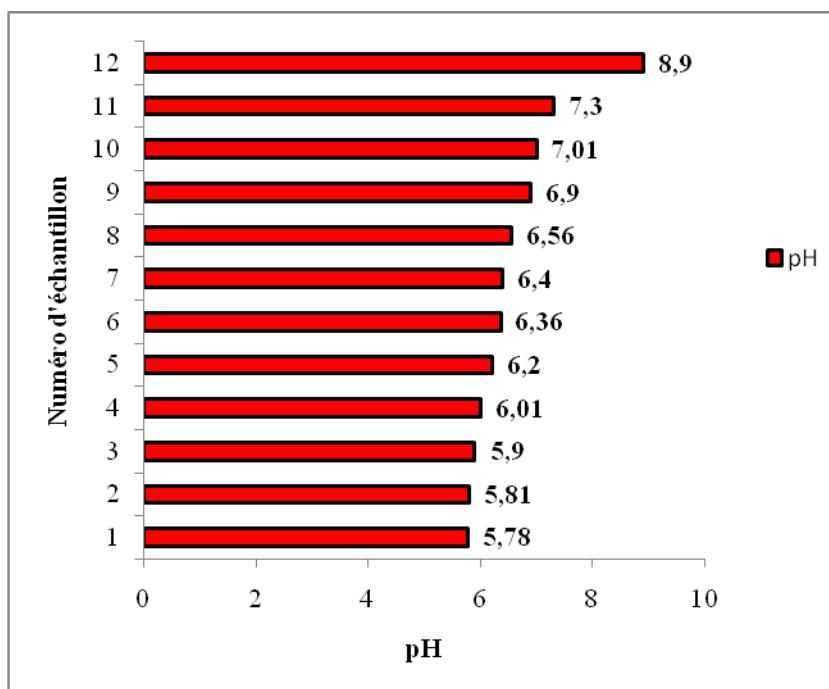


Fig. IV.22 : Évolution du pH en fonction du pourcentage de charbon ajouté.

De la figure VI.22, une plage de variation des pH est remarquée, elle est comprise entre 5.78 ± 0.31 , qui est le pH naturel du marc de café sec et 8.9 ± 1.07 , qui est le pH naturel du biocharbon issue de pyrolyse du marc de café.

Il est signalé qu'un pH neutre (7.01 ± 0.83) est obtenu pour le mélange composé de 9 g du charbon et 11 g du marc de café. Sachant que le pH d'un sol fertile, où la vie microbienne se

développe de façon optimale et où les éléments du sol sont les mieux assimilés par les plantes, se situe entre 6 et 7. Ce pH influence la capacité du sol à libérer des nutriments essentiels, et un pH mal adapté peut empêcher les racines d'absorber certains éléments nutritifs. Des pH très acides (<5.5) conduisent à un appauvrissement de la vie biologique et pourront expliquer des carences induites ou des toxicités, comme c'est le cas avec l'aluminium et de manganèse. Par contre, les sols à forte alcalinité (>8.5) prédisposent à des carences en zinc, en cuivre et en bore et peut rendre le fer moins accessible, entraînant un jaunissement des feuilles [29]. Les organismes du sol sont inhibés par une forte acidité, et la plupart des cultures poussent mieux dans des sols minéraux ayant un pH de 6,5. Autrement dit, les bactéries comme les rhizobiums ont un optimum de croissance à un pH de 7 à 7,5 [30]. En contre partie, il existe des cultures s'acclimatent plus ou moins bien à l'acidité [31]:

- Certaines s'adaptent sur des pH assez faibles: on peut citer le maïs.
- Certaines sont plus sensibles à l'acidité: telque; les légumes (haricots, épinards), l'orge (leur optimum pH se situe autour de 6,5 - 7).
- Intermédiaire : Talque le triticale.
- La lavande, prospèrent dans un sol légèrement alcalin.

IV.9. Test de valorisation du charbon comme combustible

Une expérience a été approuvée afin de quantifier l'énergie libérée suite au combustion de différents matériaux utilisés. Suite au calcul de cette énergie on utilise l'équation (III.7) nous avons pu avoir les résultats qui sont illustrés dans la figure IV.23.

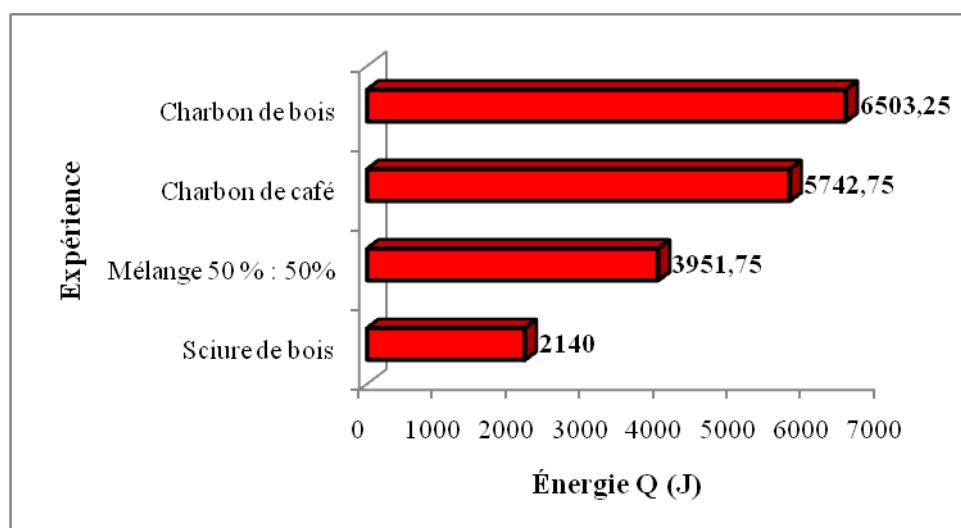


Fig. IV.23 : Résultats de test de valorisation du charbon comme combustible.

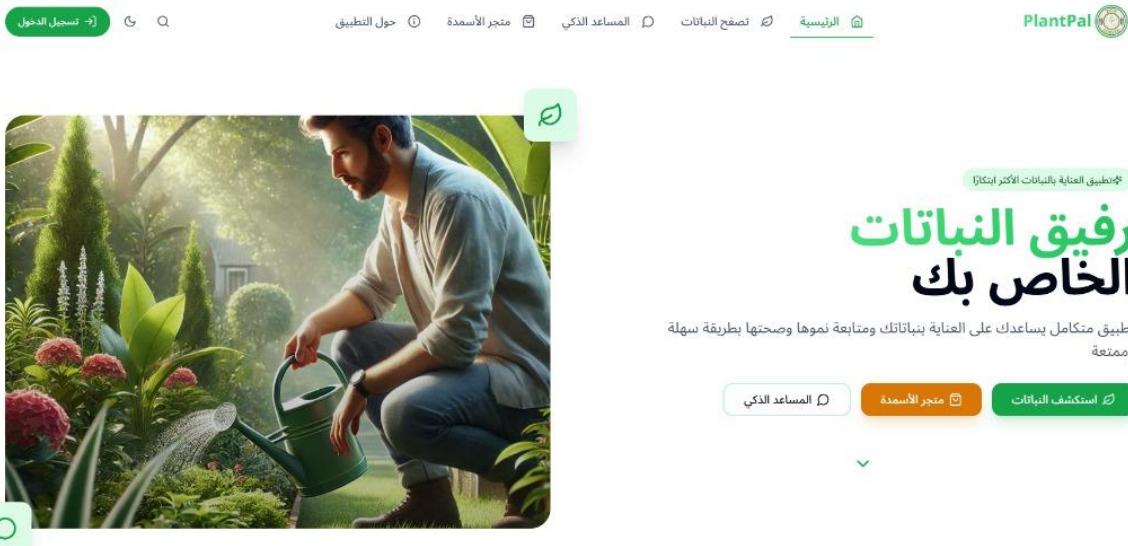
A travers la figure IV.23, nous pouvons conclure que la plus haute énergie est obtenu avec le charbon de bois (6503.25 J) et la plus faible énergie est enregistré avec la sciure de bois (2140 J), sachant que le charbon et la sciure de bois sont utilisés comme des témoins. Cependant, le charbon de café a enregistré la seconde valeur en énergie libérer (5742.75 J) après le charbon de bois. Le charbon de bois est un combustible solide utilisé pour le chauffage et la cuisson de repas. Il est créé par carbonisation [32]. Bien que l'utilisation du charbon de bois puisse être nuisible à l'environnement et à la santé publique, il est généralement un meilleur combustible pour la cuisson de repas que le bois [33]. De multiples facteurs influent sur le choix des combustibles, notamment les disponibilités, et il faut en tenir compte pour étudier la question des combustibles. A noter également que, pour simplifier l'exposé, la comparaison de rendements énergétiques présentée ci-dessus ne porte nécessairement que sur un nombre relativement limité de variables. En réalité, des éléments tels que la technologie disponible et l'efficacité des process peuvent beaucoup varier. Récemment, des efforts sont focalisés par les chercheurs pour valoriser des bioressources telque les déchets ménagère (ex : Marc de café) dans le secteur énergétique. Des bioressources très fiables qui attendent que leurs recyclages, leurs valorisations et leurs introduction en processus reeles et actuel pour minimiser les déchets et valoriser ces bioressources [34-37].

IV.10. Application Intelligence Artificiel (Plateforme (Plant-Pal))

Dans le cadre de simplifier la tâche aux différents utilisateurs et passionnés de domaine de jardinage et agriculture d'une façon générale, un programme logiciel qui utilise des techniques d'IA pour effectuer des activités spécifiques au domaine précédamment nommé est créé. L'ensemble des étapes du protocole de développement de la plateforme PlantPal (figure IV.23) a été réalisé avec succès, depuis la conception de l'interface jusqu'à l'intégration des fonctionnalités intelligentes. Ce programme comprend plusieurs spécificités:

- ❖ Interface conviviale et fluide développée en arabe via V0.dev, adaptée aux mobiles et ordinateurs, avec une navigation claire entre les sections principales (accueil, assistant, plantes, boutique...).
- ❖ Assistant intelligent intégré via l'API ChatGPT, capable de répondre en arabe aux questions liées à l'entretien des plantes de manière cohérente et pertinente.
- ❖ Suivi des soins des plantes (arrosage, fertilisation, taille) opérationnel avec un journal par plante, facilitant l'organisation personnelle de l'utilisateur.
- ❖ Reconnaissance des plantes par image fonctionnelle grâce à l'API Plant.id, testée avec plusieurs espèces végétales avec un bon niveau de précision.

- ❖ Intégration des données météorologiques selon la localisation de l'utilisateur via OpenWeather API, permettant des recommandations adaptées.
- ❖ Création d'une boutique simple permettant l'ajout de produits agricoles écologiques à titre expérimental, comme l'engrais à base de marc de café recyclé.





خدماتنا

نقدم مجموعة متكاملة من الخدمات لمساعدتك في العناية بنباتاتك والحفاظ على صحتها

حالة الطقس

تعرف على حالة الطقس المحلية وتأثيرها على نباتاتك

[اكتشف المزيد](#)

متجر المستلزمات

تسوق أفضل أنواع المستلزمات الضرورية لنباتاتك من متجرنا المتخصص

[اكتشف المزيد](#)

تحديد النباتات

التعرف على نباتاتك من خلال الصور باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي

[اكتشف المزيد](#)

مساعد ذكي

احصل على نصائح مخصصة للعناية بنباتاتك من مساعدنا الذكي

[اكتشف المزيد](#)

تعرف على النباتات

استكشف مجموعة متنوعة من النباتات وتعلم خصائصها وطرق العناية بها

[اكتشف المزيد](#)

فنات النباتات

استكشف مجموعة متنوعة من فنات النباتات المختلفة

الزيتون

شجرة
شجرة معمرة تعيش مئات السنين

الإضاءة
متوسطة

الري
اسواعياً

الترة
معدنلة إلى قاعدية

تسجيل حدث جديد

٥٩ مشاركة
أضف إلى المفضلة

مصالح العناية
طريقة الزراعة

الترة المناسبة
معتدلة إلى قاعدية

الري
يحتاج الزيتون إلى الري بانتظام مع مراعاة نوع الترفة والظروف المناخية

الفوائد
تحفيز النمو، تحسين القدرة على التحمل، تحسين جودة الزيتون

الجوية الحالية
تحديث: ١٣:١٥ ص

موقعك الحالي
آخر تحديث: ١٣:١٥ ص

حالة الطقس

تعرف على حالة الطقس المحلية وتأثيرها على نباتاتك، واحصل على نصائح للعناية بالنباتات بناء على الظروف الجوية الحالية

تفاصيل الطقس

الرطوبة: 44%

الشروع: ٠:٤٧ ص

الإحساس: 24°C

الرياح: 3.17 m/s

التوقعات القرية

غداً: 39°C / 27°C

اليوم: 37°C / 24°C

الجمعة ١٣ يونيو

٢٤°C

غيموم قاتمة

• مثالى للنباتات

حافظ على الري المنتظم

توقعات الأسبوع

The screenshot displays the PlantPal app's main interface. At the top, there is a navigation bar with links for 'تسجيل الدخول' (Login), a search icon, and a magnifying glass icon. Below the navigation bar, there is a header 'الأشجار' (Trees) with a circular logo containing a tree icon.

The main content area shows eight cards, each featuring a photograph of a tree and its name in Arabic:

- الصنوبر** (شجرة دائمة الخضرة) - Pine (Evergreen tree)
- الميلوط** (شجرة ضخمة معمرة) - Oak (Large, long-lived tree)
- النخيل** (شجرة قوية تحمل الحرارة) - Palm (Strong tree that withstands heat)
- الزيتون** (شجرة عمرها تعيش مئات السنين) - Olive (Tree that lives for centuries)
- الرمان** (شجرة فاكهة قوية) - Pomegranate (Strong fruit tree)
- الليمون** (شجرة حمضية صافية) - Lemon (Acidic, pure fruit tree)
- المانجو** (شجرة أصولية كبيرة) - Mango (Large, native fruit tree)
- التفاح** (شجرة منمرة موسعة للجسم) - Apple (Large, spreading fruit tree)

At the bottom of the screen, there is a footer with links for 'تسجيل الدخول' (Login), a search icon, and 'حول التطبيق' (About the application). To the right of the footer, there is a 'PlantPal' logo and a link to 'العودة إلى الصفحة الرئيسية' (Return to the main page).

Mérites de l'application

Le tableau suivant résume les principaux mérites de l'application PlantPal :

مميزات التطبيق	معلومات
تصفح مجموعة متنوعة من النباتات ✓	يسعى في Pal إلى جعل العناية بالنباتات أسهل وأكثر فائدة للجميع، تؤمن بأن النباتات تضييف جمالاً وصحة إلى حياتنا، ونريد مساعدة الناس على الاستفادة بفوائدها.
تبني حدول الري والتسميد لكل نبتة ✓	من خلال تقديم نصائح مخصصة، وتذكيرات للري، ومعلومات مفصلة عن كل نوع من النباتات.
تصالح مخصصة للعناية بكل نوع من النباتات ✓	نساعدك على أن تصبح خبيراً في العناية بنباتاتك.
مساعد ذكي للإجابة على أسئلتك ✓	
متجر للأسمدة العضوية عالية الجودة ✓	
مجتمع من محبي النباتات لتبادل الخبرات ✓	

Fig. IV.23 : Quelques photo prise de l'application nommée Plateforme (Plant-Pal).

Références bibliographiques

- [1]. Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins S., Teixeira, J. A. 2011. Separation and Purification Technology, 83, 173-179.
- [2]. Alice Vieira Leite-Legatti, Ângela Giovana Batista, Nathalia Romanelli, Vicente Dragano, Anne Castro Marque, Luciana Gomes Malta, Maria Francesca Riccio, Marcos Nogueira Eberlin, Ana Rita Thomazela Machado, Luciano Bruno de Carvalho-Siva, Ana Lucia Tasca Gois Ruiz, Joao Ernest de Carvalho, Gláucia Maria Pastore, Mário Roberto Maróstica Júnior. 2012. *Jaboticaba peel: Antioxidant compounds, antiproliferative and antimutagenic activities*. Food Research International. 49(1), 2012, 596-603.
- [3]. Cruz, R., Mendes, E., Torrinha, A., Morais, S., Pereira, J.A., Baptista, P. Casal, S. 2015. Revalorization of spent coffee residues by a direct agronomic approach. Food Research International, vol. 73, p.190-196.
- [4]. Peshev, D., Mitev, d., Peeva, L., Peev, G. 2018. Valorization of spent coffee grounds – A new approach. Separation and Purification Technology Volume 192, 9 February 2018, Pages 271-277
- [5]. Campos-Vega, R., Loarca-Pina, G., Vergara-Castaneda, H. A., Oomah, B. D. 2015. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. Trends in Food Science & Technology, 45(1), 24-36.
- [6]. Kuan, C. Y., Yuen, K. H., Bhat, R., Liong, M. T. 2011. Physicochemical characterization of alkali treated fractions from corncob and wheat straw and the production of nanofibres. Food research international, 44(9), 2822-2829.
- [7]. Masatoshi, T., Wasana, K., Hiroshi, M., Mikiji, S. 2016. Thermal analysis and dust explosion characteristics of spent coffee grounds and jatropha. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 44, 538-543.
- [8]. Lyman, D.J., Benck, R., Dell, S., Merle, S., Murray-Wijelath, J. 2003. FTIR-ATR analysis of brewed coffee: effect of roasting conditions. J. Agric. Food Chem. 51, 3268-3272.
- [9]. Hsieh, P.F., Wen, T.Y. 2020. Evaluation of ozone Removal by spent coffee grounds. Sci. Rep. 10 (124), 1-8.
- [10]. Chun, Y., Ko, Y.G., Do, T., Jung, Y., Kim, S.W., Choi, U.S. 2019. Spent coffee grounds: massively supplied carbohydrate polymer applicable to electrorheology. Colloid. Surface. Physicochem. Eng. Aspect. 562, 392-401.

- [11]. Dai, Y., Zhang, D., Zhang, K. 2016. Nitrobenzene-adsorption capacity of NaOH modified spent coffee ground from aqueous solution. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 68, 232-238.
- [12]. Chien, H.W., Kuo, C.J., Lin, G.Y., Chen, P.Y. 2019. Polysaccharidic spent coffee grounds for silver nanoparticle immobilization as a green and highly efficient biocide. Int. J. Biol. Macromol. 140, 168-176.
- [13]. McNaught, A.D., Wilkinson A. 1997. IUPAC compendium of chemical terminology (second ed.), Blackwell Science, Oxford (UK).
- [14]. Antal, M.J., Gronli M. 2003. The art, science, and technology of charcoal production Ind. Eng. Chem. Res. 42, 1619-1640.
- [15]. Udeh, N., James B. L. 2022. Production and characterization of paw-paw trunk activated carbon Am. Acad. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci., 87 (1), 9.
- [16]. Kong, S.H., Loh, S.K., Bachmann, R.T., Rahim, S.A., Salimon J. 2014. Biochar form oil palm biomass: A review of its potential and challenges. Renew. Sust. Energy. Rev. 39, 729-739.
- [17]. Van de Velden, M., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B., Dewil R. 2010. Fundamentals, kinetics and endothermicity, of the biomass pyrolysis reaction. Renew Energy, 35, 232-242.
- [18]. Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., Gomez-Barea A. 2011. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. Prog. Energy Combust, 37, 611-630.
- [19]. Baligar, V.C., Fageria, N. K., Eswaran, H., Wilson M. J., Zhenli He. 2004. *Nature and Properties of Red Soils of the World », The Red Soils of China: Their Nature, Management and Utilization*, Dordrecht, Springer Netherlands. 7-27. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2138-1_2,
- [20]. Veena B. 2022. *A Textbook of I.C.S.E Geography*, New Delhi, Goyal Brothers Prakashan.
- [21]. Anonyme. Consulté le 22/06/2025.
http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/guide_mf_et_sc_final _01_02_2005.pdf
- [22]. Khan, K., Pankaj, U., Verma, S.K., Gupta, A.K, Singh, R.P. Verma R. K. 2015. Bio-inoculants and vermicompost influence on yield, quality of Andrographis paniculata, and soil properties. Industrial Crops and Products. 70, 404-409.

- [23]. Kim, M.J., Shim, C.K., Kim, Y.K., Hong, S.J., Park, J.H., Han, E.J., Kim, J.H., Kim, S.C., 2015. Plant Pathol J. 31(3), 259-268. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.02.2015.0024>
- [24]. Makkar, C., Singh, J. Parkash, C. 2017. Vermicompost et vermiwash comme complément pour améliorer l'ensemencement, la croissance des plantes et le rendement de Linum usitatissimum L. pour l'agriculture biologique. Int. J. Recycl. Org. Waste Agricult., 6, 203-218. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0168-4>.
- [25]. Sundararasu, K. 2019. Growth and Yield Effects of Vermicompost and Vermicompost Rubbish on Selected Vegetable Crop. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 8(02), 975-984.
- [26]. Zarei, M., Jahandideh, M., Abadi, V.A., Moridi, A. 2018. Comparaison des propriétés du vermiwash et du lombricompost proposé à partir de différents lits organiques dans des conditions de serre. Int. J. Recycl. Org. Waste Agricult., 7, 25-32. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0186-2>.
- [27]. Luo, H., He, L., Du, B., Z., W., Zheng, A. et al. 2019. Foliar application of selenium (Se) at heading stage induces regulation of photosynthesis, yield formation, and quality characteristics in fragrant rice. Photosynthetica, 57(4), 1007-1014. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.114>.
- [28]. Shafiqueun, I., Andleebun, S., Saim aftabun, M., Naeemb, F., Alic, S., Yahyaun, S., Ahmedun, F., Tabasum, T., Sultand, T., Shahidun, B., Khane, A.H., U.I. islamun, G., Arshad, W. 2021. Efficiency de vermi-compost à base de bouse de vache sur la germination des graines et les plantes paramètres de croissance de tagetes erectus (Souci). Heliyon, 7, e05895, 11.
- [29]. Anonyme. Consulté le 30-06-2025. <https://laboratoiremezagri.fr/le-ph-du-sol-un-parametre-cle-pour-des-cultures-en-bonne-sante/>
- [30]. Anonyme. Consulté le 30-06-2025. https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Cat%C3%A9gorie:PH_du_sol
- [31]. Anonyme. Consulté le 30-06-2025. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/classification-des-sols/systemes-numeriques/proprietes-chimiques/fr/>
- [32]. Anonyme. Consulté le 29/06/2025. UN Food and Agriculture Organization. 2015. *Industrial Charcoal Making*. Available: <http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e03.htm>
- [33]. Anonyme. Consulté le 20/06/2025. The World Bank. 2015. *Tracking Access to Nonsolid Fuel for Cooking*. Available: <http://www->

wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2014/05/15/000333037_20140515114123/Rendered/PDF/880590BRI0know00Box385214B00PUBLIC0.pdf

- [34]. Sourisse, C. 2017. Les ressources du futur issues du monde vegetal. Editeur : Covabis.
- [35]. Legalland J.P. 2008. Biocarburants / Cinq questions qui dérangent. Editions Technip.
- [36]. Hervé, B., Paul M. 2013. La biomasse, énergie d'avenir. Editions Quae.
- [37]. Bernard, P. 2015. Energies renouvelables en agriculture. Editions France Agricole.

Conclusion général

Conclusion

Les pays du monde sont conscients de la nécessité impérative de l'environnement pour cela de plus en plus des travaux sont mis en œuvre pour trouver des solutions économiquement sociales et environnementales rentables. Notre étude s'inscrit dans ce contexte de gestion durable de l'environnement, par ce qu'elle permet de valoriser un déchet abondamment disponible dans notre pays.

Dans cette étude nous avons constatés que les grandes quantités rejetées par les lieux générant ce type de déchet, au niveau de la wilaya de Saida, sans être valorisée. Aucune filière de récupération ou de valorisation de ce déchet n'existe à Saida.

Pour répondre à cet objectif, Il faut passer par plusieurs étapes. Tout on commençons par les caractéristiques physico-chimiques du marc de café. Ensuite, la valorisation de cette matière organique.

Au début, une enquête sur terrain avec les cafeteria a été mené, dont nous avons constatés que la quantité rejetée du marc de café n'est pas négligeable. Nous avons estimé une quantité de 177 672 kg/an et qu'il n'existe pas de filière de collecte pour le marc café, il est jeté directement dans les points de pré collecte (bennes ou autres) pour finir dans les C.E.T et les décharge. Ce déchet est un produit contenant beaucoup de composés, à caractère écotoxique qui ne doivent pas se retrouver dans la nature, particulièrement dans les cours d'eau.

Pour diminuer l'impact de ce déchet sur les décharges et CET, il est recommander de le récupérer et le valoriser comme matière secondaire pour différentes utilisation agricole ou autres. Pour ce faire, nous avons entrepris un travail multidisciplinaire en impliquant plusieurs domaines et disciplines en commençant par une caractérisation chimique à travers la détermination de leur humidité, matière organique et pH. En deuxième lieu, une détermination de leur potentiel sur le développement de la variété *Laitue* et de déterminer leur efficacité en tant que fertilisants organiques, tout en favorisant une gestion durable des ressources agricoles d'un coté. D'un autre coté, essayé de valoriser le biocharbon issue d'opération de pyrolyse en tant qu'un combustible utilisé en valorisation énergétique.

Parallèlement, une application a été créée aux utilisateurs en domaine d'agriculteurs pour qu'ils bénéficient des particularités qu'elle contienne.

La caractérisation chimique du marc de café révèle une hausse de la quantité de matière sèche (86.75%). Le taux de matière organique (74.77%) est, en contrepartie, important dans le marc du café. Un pH légèrement acide est enregistré (5.7).

L'analyse par spectrophotométrie IRTF nous dévoile la présence de plusieurs groupements en particulier groupes d'alcanes, des sucres, des esters aliphatiques ou les triglycérides d'origine lipidique, matériau lignocellulosique typique composé de polysaccharides et de polymères aromatiques.

Les mêmes substrats sont analysés par DRX, on permet de détecter des composés organiques thermorésistants stables (ex.: biochar) à un taux de 97.2 %.

La pyrolyse dans un four à 450 °C durant 30 min s'avèrent les conditions opératoires idéales pour obtenir un meilleur rendement en masse de biocharbon.

Dans un deuxième temps, cette étude montre l'intérêt de valoriser ce sous-produit agricole (le marc de café) dans la fertilisation des cultures. Ces fertilisants organiques améliorent non seulement la structure du sol, mais contribuent également à une agriculture plus durable en réduisant l'usage d'engrais minéraux. Ces résultats nous ont amené à considérer les divers types de déchets comme la matière première la plus efficace pour produire des biofertilisants de qualité satisfaisante, répondant à la problématique d'usage de la matière organique des sols et permettant de satisfaire les attentes de la profession agricole.

Ces résultats nous suggèrent le rôle intéressant des biofertilisants, et la fabrication de nouveau compost utilisant des déchets ménagers tels que le marc de café comme matériaux initiaux.

D'un point de vue comparative, d'autres études son d'importance majeures, à savoir :

- Des études plus approfondies dans ce domaine sont nécessaires afin de mieux caractériser la composition de différents types d'engrais et ses effets sur la croissance et sur la bio productivité des grandes cultures.
- Nous suggérons également que c'est par cette voie que nous pourrons mettre en place des méthodes de production et de protection stables, économiquement rentables et respectueuses à l'environnement.

Enfin, notre étude ouvre la voie à d'autres recherches pour une application plus large et plus approfondie de ce type de supports à la valorisation des déchets.

Annexe

Tableau 11. Conversion du marc de café en charbon

Température (°C)	Durée (min)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Rendement (%)
380.00	30.00	400.00	20.00	5.00
380.00	15.00	400.00	10.00	2.50
380.00	20.00	400.00	14.90	3.72
400.00	30.00	400.00	70.00	17.50
400.00	15.00	400.00	55.00	13.75
400.00	20.00	400.00	63.00	15.75
450.00	30.00	400.00	100.92	25.23
450.00	15.00	400.00	98.70	24.68
450.00	20.00	400.00	100.00	25.00
500.00	30.00	400.00	40.00	11.50
500.00	15.00	400.00	46.00	10.00
500.00	20.00	400.00	43.80	10.95

Tableau 12. Hauteurs moyennes des plants (en cm)

Jour	Composition de sol + moment d'ajout du Marc de café			
	Terre rouge agricole + Marc de café avant Germination (1)	Terre rouge agricole + Marc de café Après Germination (2)	Mélange terre de labo (terreau) et terre rouge agricole + Marc de café avant Germination (3)	Terre rouge agricole Sans Marc de café (4)
Jour 5	0 ±0	2 ±0.05	0 ±0	2 ±0.09
Jour 10	0 ±0	13 ±0.97	4 ±0.22	8 ±0.58
Jour 15	0 ±0	16 ±0.99	6 ±0.31	10 ±0.87
Jour 20	0 ±0	16 ± 1.02	6 ±0.30	10 ±0.91
Jour 25	0 ±0	18 ±1.01	6 ±0.29	10 ±0.96

Jour 30	0 ± 0	18 ± 0.99	6 ± 0.40	10 ± 0.82
---------	-------	-----------	----------	-----------

Tableau 13. Résultats de test d'ajustement de pH du marc de café utilisé comme engrais

Echantillon N°	Composition du mélange		pH mesuré
	Charbon (g)	Marc de café (g)	
1	20	0	8.9 ± 1.07
2	0	20	5.78 ± 0.31
3	1	19	5.81 ± 0.39
4	2	18	5.9 ± 0.4
5	3	17	6.01 ± 0.42
6	4	16	6.2 ± 0.38
7	5	15	6.36 ± 0.46
8	6	14	6.4 ± 0.5
9	7	13	6.56 ± 0.6
10	8	12	6.9 ± 0.81
11	9	11	7.01 ± 0.83
12	10	10	7.3 ± 0.97

Tableau 14. Résultats de test de valorisation du biocharbon comme combustible

Expérience	c (J/kg·°C)	ΔT (°C)	Énergie Q (J)
Sciure de bois	2000	107.0 ± 7.88	2140.0 ± 82.12
Mélange 50% Sciure de bois + 50% Charbon de café	1650	239.5 ± 12.51	3951.75 ± 92.12
Charbon de café	1300	441.75 ± 31.02	5742.75 ± 95.08
Charbon de bois	1300	500.25 ± 40.86	6503.25 ± 99.71